

Rédigé par :

Sami AOURAGHE

Juan Jose A. BERNET

Valentin DAUJAT

Hannah NILSSON ÂHMAN

PROJET INDUSTRIEL

ETUDE DE STRUCTURES EN ALUMINIUM EXPOSEES EN EXTERIEUR

EN LIEN AVEC LE MUSEE DE L'HISTOIRE DU FER



Octobre 2015 – Juin 2016

Tuteur de projet : Mme Delphine RENAUX ; Mr Emmanuel ROCCA

Encadrants : Mme Odile LASSERE ; Mme Louise CHAMPIGNEULLE ; Mme
Sandrine DERSON

RESUMES

RESUME:

Ce projet, qui est une collaboration entre l'EEIGM (Ecole Européenne d'Ingénieurs en Génie des Matériaux) et le musée de l'histoire du fer à Nancy, concerne l'exposition à l'extérieur de trois pièces en aluminium conçues par l'architecte nancéien Jean Prouvé, à savoir un portique, initialement installé à l'entrée de l'aéroport de Paris Orly en 1993, et actuellement exposé à l'entrée du musée ; un facsimilé du Shed MAME qui faisait partie de la toiture en dent de scie de l'imprimerie MAME à Tours et qui lui aussi est placé à l'extérieur au musée ; et finalement une poutre transversale du Pavillon du centenaire de l'aluminium construit à Paris en 1954, et actuellement entreposé.

Le projet est composé de trois parties. La première est une collecte d'informations des propriétés d'aluminium et son utilisation dans le bâtiment. La seconde est une recherche bibliographique concernant les trois pièces en question. Elle comporte une compilation de leurs histoires, les données techniques acquises ainsi qu'une évaluation de leurs états actuels. La dernière partie propose une panoplie de solutions vis-à-vis des problèmes recueillis en seconde partie. Elle comporte également quelques recommandations quant à la manière d'exposition de la poutre à l'espace extérieur du musée.

Découvert vers le XIXème siècle, l'aluminium a été produit à grande échelle particulièrement après l'apparition du processus Bayer en 1884. Sa légèreté, combinée à d'autres propriétés intéressantes ont fait de lui un matériau largement utilisé dans divers applications, notamment dans le bâtiment et l'industrie automobile où il est le matériau par excellence aujourd'hui. En outre, un ensemble d'alliages classés en fonction des métaux ajoutés et de leurs traitements est disponible pour augmenter leurs applicabilités.

Les alliages généralement utilisés dans la construction comportent les séries 3XXX, 5XXX et 6XXX. On sait que Jean Prouvé a utilisé les séries 5XXX et 6XXX. La 5XXX comprend l'alliage d'aluminium avec le magnésium qui favorise son usinabilité et améliore sa résistance à la corrosion, tandis que la 6XXX est un alliage d'aluminium, de silicium et de magnésium. Les alliages 6xxx ont une meilleure coulabilité, mais sont moins résistants à la corrosion.

Même si ces alliages sont bien choisis en fonction de leurs domaines d'utilisation, quelques problèmes se manifestent, par exemple la corrosion galvanique et les piqûres pour les alliages 5XXX et 6XXX. Les facteurs externes, bien entendu, ne peuvent que favoriser l'apparition de ces problèmes, on cite la composition atmosphérique, les facteurs chimiques et thermiques, ainsi que le vieillissement et l'impact humain.

Après analyse de l'état des objets, il a été établi que les trois pièces présentent les mêmes problèmes. Ils comportent la corrosion galvanique, l'oxydation du fer, la corrosion par piqûres ainsi que des dommages physiques et de la saleté couvrant de larges surfaces. Pour le portique, l'oxydation du fer constitue le plus fréquent problème, tandis que la corrosion galvanique causée par le contact entre le fer et l'aluminium demeure le problème majeur pour la poutre et le shed.

Finalement, un ensemble de solutions a été proposé pour empêcher d'éventuelles dégradations des pièces. Pour ce faire, nettoyer, appliquer une couche protectrice et substituer toutes les pièces corrodées sera nécessaire. Par ailleurs, il sera essentiel de s'assurer qu'il n'y ait aucun contact entre le fer et l'aluminium pour éviter que la corrosion ne se produise dans le futur. Des propositions de l'installation de la poutre sont aussi discutées.

ABSTRACT:

This project is a collaboration between the EEIGM (European Engineering School in Material Science) and the History of Iron Museum in Nancy, concerning the outdoor exhibition of three objects in aluminum designed by Nancy's architect Jean Prouvé. The three pieces include; a gantry, originally installed as the entrance of the airport of Orly (Paris) in 1959, currently placed at the entrance of the museum; a facsimile of the shed MAME, a part of a saw-tooth roof from the printers shop MAME, also exhibited in the outdoor area of the museum; and finally a cross beam from the Pavilion of Aluminum constructed in Paris in 1954, currently in storage.

The project is divided into three parts. The first part includes the gathering of information regarding the properties of aluminum and its use in construction. The second part treats the research concerning the three pieces in question. It includes a compilation of their history, the technical information acquired as well as an evaluation of their current physical states. The last part offers a range of solutions to the eventual problems identified in part two. In addition, it includes the recommendations on how to exhibit the cross beam in the outdoor area of the museum.

The aluminum was discovered in the 19 century, with a larger scale production being put in place after the invention of the process Bayer in 1884. Due to its light weight along with other interesting properties aluminum offers a number of applications. Today it is frequently used in the car industry as well as in construction. Moreover, in order to increase the applicability, a range of alloys are also available, classified according to the alloying metals added and how they are being processed.

Alloys commonly used in construction include the 3XXX, 5XXX and 6XXX series. Among these alloys we know that the 5XXX and 6XXX series has been used by Prouvé. The 5XXX aluminums are alloyed with magnesium, while the 6xxx alloys include those with silicon along with magnesium.

Even though these alloys are well adapted for the applications in which they are used, some problems still remain. For the 5XXX and 6XXX alloys galvanic corrosion and pitting are two examples. However, surface treatments and eliminating the contact areas between the aluminum and iron will reduce these effects.

After an analysis of the state of the objects it has been established that the same problems can be identified for all three. The ones observed include galvanic corrosion, iron oxidation, pitting corrosion along with physical damages and large areas covered in filth. For the gantry, oxidation of iron is the prevailing problem, while for the cross beam as well as for the shed the main problem is caused by galvanic corrosion due to the contact between iron and aluminum.

Subsequently, in order to hinder any further degradation of the pieces, a range of solutions has been offered. Cleaning and applying a protective coating along with replacing all the corroded iron details will be necessary. Furthermore, making sure there is no connection between the iron and the aluminum is also essential so as to avoid further corrosion in the future.

Finally, when it comes to the exhibition of the beam, after an analysis with the Finite Element Method, several options have been discussed in order to find the solution that is best suited for an outdoors installation at the History of Iron Museum.

RESUMEN:

Este proyecto consiste en una colaboración entre el EEIGM (Escuela Europea de Ingenieros en Materiales) y el Museo de Historia del Hierro en Nancy, concerniendo la exhibición de tres objetos de aluminio diseñados por el arquitecto procedente de Nancy, Jean Prouvé. Las tres piezas incluyen: un pórtico, originalmente instalado en la entrada del aeropuerto de Orly (París) en 1959 y actualmente instalado en la entrada del museo, un facsímil de la cúpula MAME, una parte del tejado en forma de sierra de la imprenta MAME, también exhibida en el área exterior del museo y, finalmente, una viga perteneciente al pabellón de aluminio construido en París en 1954, actualmente en el almacén del museo.

El proyecto ha sido dividido en tres partes. La primera parte incluye la búsqueda de información en relación con las propiedades del aluminio y su uso en la construcción. La segunda parte trata de la investigación concerniente sobre las tres piezas en cuestión. Esta incluye una compilación de sus historias, información técnica adquirida así mismo como una evaluación del estado físico actual. Las últimas partes ofrecen distintas soluciones a problemas identificados en la segunda parte. Además, esta incluye recomendaciones de como exhibir la viga en el área exterior del museo.

El aluminio fue descubierto en el siglo XIX, con una gran producción a escala mundial después del descubrimiento del proceso Bayer en 1884. Debido a su baja densidad además de otras propiedades interesantes, el aluminio ofrece numerosas aplicaciones. Hoy en día es frecuentemente utilizado en la industria automovilística, asimismo como dentro del sector de la construcción. Aún más, para mejorar su aplicabilidad, una gran variedad de aleaciones han sido creadas, clasificadas según los aleantes añadidos y el proceso de producción.

Las aleaciones más utilizadas en construcción incluyen las series 3XXX, 5XXX y 6XXX. Entre estas familias de aleaciones, sabemos que las series 5XXX y 6XXX fueron utilizadas por Prouvé. La serie 5XXX de aluminio son aleadas con magnesio, mientras que la serie 6XXX es aleada con silicio y magnesio.

Incluso estando estas aleaciones bien adaptadas para su aplicación, es normal que surjan problemas. Para las series 5XXX y 6XXX, la corrosión galvánica y su variante, el “picado”, son dos claros ejemplos. En cualquier caso, el tratamiento superficial paliativo y la eliminación de áreas en contacto entre el aluminio y el hierro deberían reducir estos efectos.

Después de un análisis del estado de las piezas, ha sido establecido que los mismos problemas se pueden hallar en las tres. Entre estos, observamos la corrosión galvánica, la oxidación por contacto con hierro, el “picado” corrosivo además de daños físicos y grandes áreas de suciedad. Para el pórtico, la oxidación del hierro es el problema más extendido, mientras que para la viga y la cúpula, el problema principal es debido a la corrosión galvánica producida por el contacto Hierro - Aluminio.

Consecuentemente, para evitar cualquier degradación posible de las piezas, un gran rango de soluciones han sido propuestas. Limpiar y aplicar una capa protectora, además de remplazar los detalles corroídos de hierro sería necesario. Además, asegurar que no hay contacto directo entre el hierro y el aluminio es esencial para evitar futuras corrosiones.

Finalmente, referente a la exhibición de la viga, después de un análisis por el método de los elementos finitos, diversas opciones han sido discutidas en orden para encontrar la mejor solución para la instalación en el exterior de la viga en el Museo de Historia del Hierro.

TABLE DES MATIERES

Résumes	2
---------------	---

I. GESTION DE PROJET

1. Périmètre du projet	10
2. Méthode & Outils utilisés	10
2.1. PBS	10
2.2. Gantt	11
2.3. WBS	12
2.4. Moyen de communication	12
2.5. Ordre du jour / Compte rendu	13
3. Points de vigilance solutionnés	13
4. Retour d'expérience	14

II. JEAN PROUVE & L'ALUMINIUM

1. Bibliographie d'un artiste : Jean Prouve	16
2. L'aluminium	18
2.1. Les alliages d'aluminium	21
2.1.1. Les alliages de moulage	22
2.1.2. Les alliages de corroyages	24
2.2. Méthodes de caractérisation	27
2.2.1. SDL	27
2.2.2. LIPS	29
2.2.3. Microscopie Optique	29
2.2.4. Microscopie Electronique à Balayage	30
2.2.5. Diffraction de Rayons X	31
2.3. Les alliages utilisés dans les pièces	31
2.3.1. Les alliages de la famille des 5XXX	31
2.3.2. Les alliages de la famille des 6XXX	33
3. Dégradation de l'Aluminium en conditions atmosphériques	35
3.1. La corrosion	35
3.1.1. Corrosion galvanique	35
3.1.2. Cellule de contraintes	36
3.1.3. Corrosion microbiologique	36

3.1.4. Corrosion due à l'hétérogénéité du matériau	36
3.1.5. Corrosion par aération différentielle	37
3.1.6. Corrosion par érosion.....	37
4. Facteurs atmosphériques qui affectent les matériaux.....	38
5. Problèmes et solutions traditionnelles existants pour l'aluminium	39
5.1. Saleté et nettoyage d'attaques microbiologiques	39
5.1.1. Attaques microbiologiques.....	41
5.2. Défauts macrostructuraux	41
5.2.1. Contraintes mécaniques extérieures.....	42
5.2.2. Effet de la température, dilatation	42
5.2.3. Effet du temps : influence et changement de la microstructure	44
5.2.4. Effet humain	44
6. Les solutions existantes pour la restauration et la conservation de l'aluminium	44
6.1. Conversion électrolytique (Anodisation).....	45
6.2. Conversion chimique.....	47
6.2.1. Conversion au titane ou au zirconium.....	47
6.2.2. Revêtement au Silane.....	47
6.3. Peintures de Finition	47
6.3.1. Polyuréthanes	47
6.3.2. Acryliques.....	47
6.3.3. Alkydes.....	48
6.3.4. Vinyles.....	48
6.4. Vernis.....	48
6.5. Restaurateurs	49

III. LES PIÈCES DE JEAN PROUVE

1. Le portique d'Orly	51
1.1. Description physique	51
1.2. Chronologie	52
1.3. Etat actuel	52
1.4. Etude des problèmes majeurs	60
2. Deuxième pièce : La poutre du Pavillon de l'aluminium.....	62
2.1. Description physique	62
2.2. Chronologie	63
2.3. Etat actuel	63
2.4. Etude des problèmes majeurs	69
2.5. Installation de la poutre	70

2.5.1. Analyse d'elements finis avec les logiciels CATIAv4 et ABAQUS	70
2.5.2. Conclusion	72
3. Troisième pièce; Le Shed MAME	73
3.1. L'imprimerie Mame.....	73
3.2. Description physique	75
3.3. Etat actuel	76
3.4. Etudes des problèmes majeurs	86
4. Bilan sur les défauts de Toutes les pièces	88
5. Préconisation	89
5.1. Introduction	89
5.2. Corrosion Galvanique.....	89
5.3. Noircissures.....	91

IV. CONCLUSION

1. Corrosion des taches noirs	93
2. Saleté.....	93
3. Corrosion.....	93
4. Impacts et fractures.....	93
5. Protection à long terme.....	93
5.1. Recouvrement	93
5.2. Nettoyage.....	93
Bibliographie.....	94
Table des illustrations	97

V. ANNEXES

Annexe 1 : Diagramme de Pareto	100
1. Définition et utilité.....	100
2. Construction	100
3. Exploitation et conclusions	100
Annexe 2 : Vernis.....	101
Annexe 3 : Restaurateurs	103

« Pour atteindre la vérité, il faut une fois dans la vie se défaire de toutes les opinions qu'on a reçues, et reconstruire de nouveau tout le système de ses connaissances. »

René Descartes

I. GESTION DE PROJET

1. PERIMETRE DU PROJET

Lors de la première année de cycle ingénieur à l'EEIGM (Ecole Européenne d'Ingénieurs en Génie des Matériaux) des projets ATI, durant l'année complète, sont proposés aux élèves. Le musée de l'histoire du fer propose chaque année un sujet concernant des structures métalliques exposées dans le musée ou en voie d'exposition.

En effet, cette année, le musée a constaté une dégradation de 2 pièces exposées dans la cour du musée. Il s'agit d'une pièce d'un architecte connu ayant été créée dans les années 1950. Il s'agit du portique d'Orly. La deuxième pièce est un fac-similé, créé par des élèves du lycée Jean Prouvé, d'un des Shed Mame de Jean Prouvé des années 1950. La directrice du musée du fer a donc pensé à une collaboration avec l'EEIGM afin que des élèves, étudiant en matériaux, examinent les structures et préconisent des solutions de nettoyage et d'entretien à long terme. Une deuxième partie du projet concerne une troisième pièce de Jean Prouvé mais qui n'est toujours pas exposée au musée. Il s'agit donc d'étudier de la même manière que précédemment la troisième structure avec cependant une partie consacrée à l'exposition de celle-ci afin de limiter les problèmes structuraux et de dégradation après des années d'expositions. En effet, cette pièce, une poutre du pavillon du centenaire de l'aluminium, est actuellement stockée dans la réserve du musée du fer.

Pour la résolution de ce projet, nous sommes quatre étudiants de l'EEIGM : Aouraghe Sami, Arrebola Bernet Juanjo, Daujat Valentin et Nilsson Åhman Hanna. Afin que le projet se déroule de la meilleure des façons, il nous a été possible de compter sur l'appui de nos tuteurs école Mme Delphine Weys-Renaux et Mr Emmanuel Rocca ainsi que la directrice du musée du fer Mme Odile Lasserre et la responsable de la conservation des pièces au musée Mme Sandrine Derson.

2. METHODE & OUTILS UTILISES

Pour un déroulement optimal du projet, et suite à une conférence de Mme Rachel Altemeyer, le groupe a opté pour l'utilisation d'outils de gestion de projet. En effet, il a été décidé d'utiliser un diagramme de Gantt, un PBS, un fichier de personnes ressources et un WBS.

2.1. PBS

Dans un premier temps, le PBS (figure 1) a été un outil majeur au début de notre projet. En effet, celui-ci nous a permis de regarder notre projet sous sa globalité et de programmer ensuite le diagramme de Gantt adéquate à la réalisation du projet. Il permet de lister les différentes phases avec l'ensemble des points à aborder à l'intérieur de celles-ci.

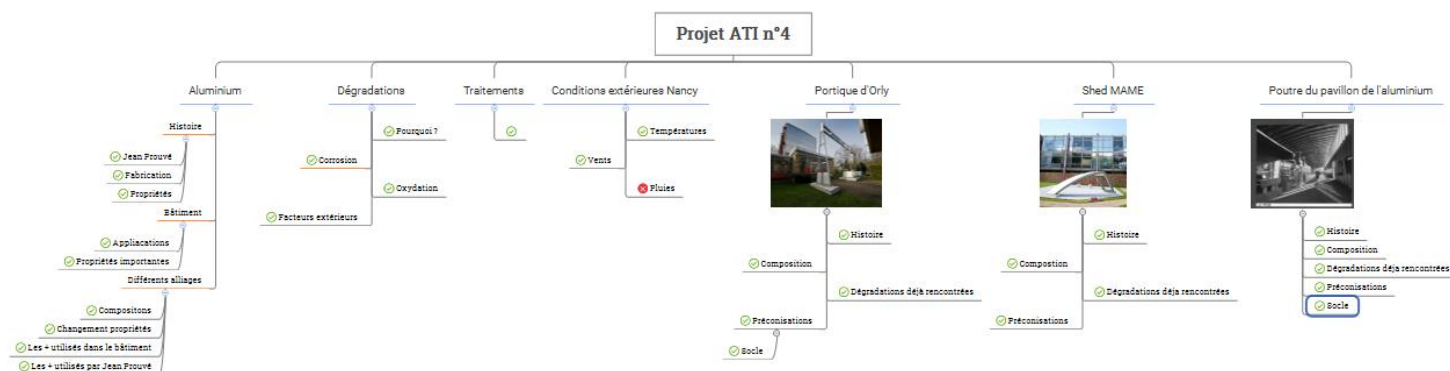


FIGURE 1. PBS

Il est possible de remarquer que la composition de la pluie en Lorraine n'a pas été trouvée, nous n'avons donc pas eu la possibilité de préconiser une solution en prenant en compte le facteur pluie.

2.2. GANTT

Comme énoncé précédemment, le diagramme de Gantt a été élaboré suite au découpage du projet. Le projet a été divisé en 8 phases comme le montre le diagramme de Gantt (figure 2.a).

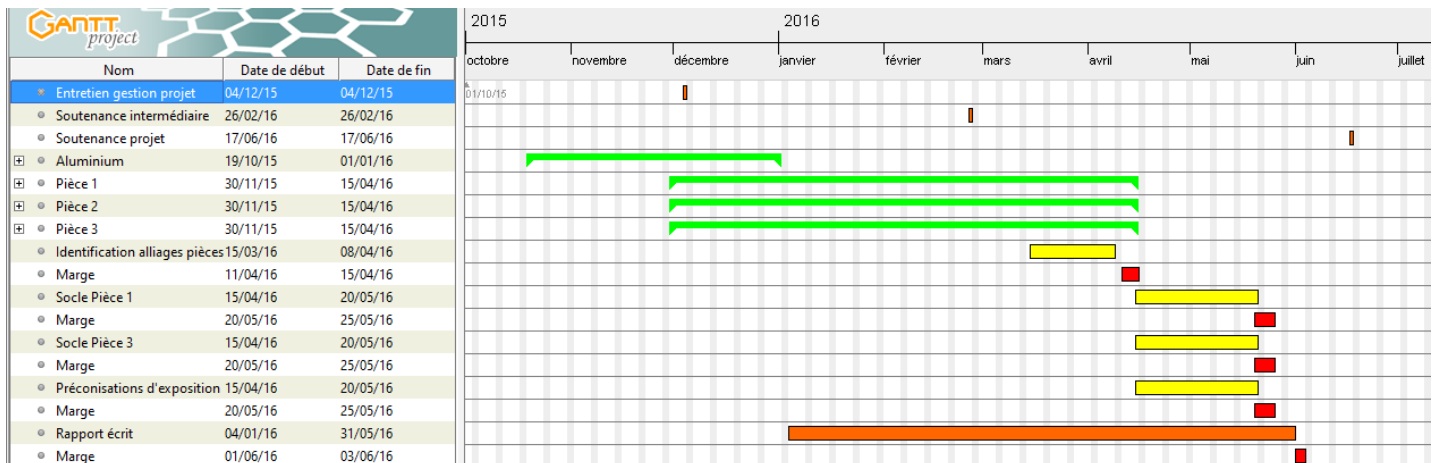


FIGURE 2. GANTT GENERAL

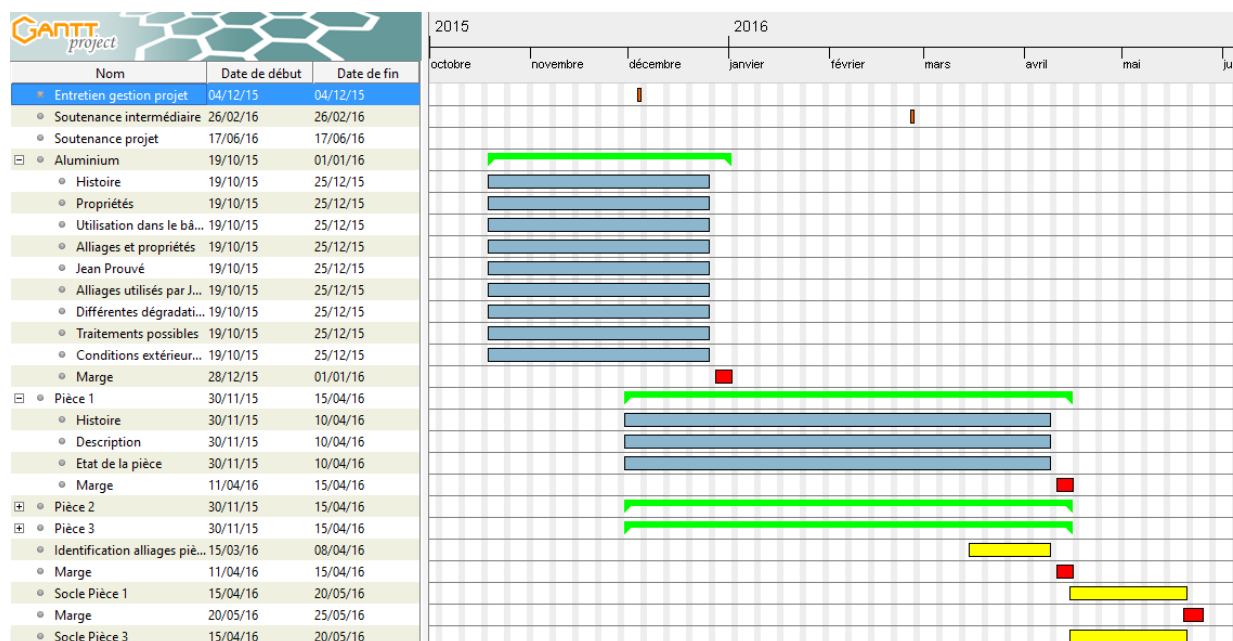


FIGURE 3. GANTT DETAILLE POUR DEUX PHASES

A l'intérieur de 4 phases, ils existent différents points à traiter (figure 2.b). En effet, il s'agit des points importants pour la préconisation des solutions.

Il a été important pour nous de suivre le diagramme de Gantt car chaque phase du projet avait besoin d'informations d'une autre phase. Le diagramme de Gantt a donc été un atout primordial pour notre projet.

2.3. WBS

C'est là qu'intervient le WBS (figure 3), séparant le travail à faire entre les différents membres du groupe. En effet, le WBS était mis à jour chaque semaine lors des réunions avec les tuteurs ou au sein du groupe. Il permettait de programmer, sur une période de une voir deux semaines, les tâches de chacun à savoir les recherches bibliographiques, l'envoi de mail ou encore le déplacement dans des bibliothèques de la ville. Il servait en même temps d'agenda avec les différents points à améliorer dans le projet lors du commencement du rapport et les dates importantes.

En effet, le rapport a été commencé en janvier afin de mettre en page l'ensemble des recherches effectuées mais, au bout d'une période de 3 mois, le plan du rapport s'est avéré problématique. Après discussion avec les tuteurs, le plan a donc été modifié ce qui a demandé une communication optimale au sein du groupe afin que le rédacteur du projet puisse mettre en ordre le rapport le plus rapidement possible. Ceci a donc été possible grâce à l'utilisation de cet agenda présent dans un dossier Google Drive.

53							
54	Done	Resources	ID	Priority	Task	Durance [day]	Initial Time (16/10)
55	X	V	52	1	Changer le Gannt	1	49
56	X	J	53	1	Liste des choses à faire au RDV	1	49
57	X	S	54	1	Prendre RDV	1	49
58	X	VS	55	1	Prendre RDV	1	49
59	X	H	56	1	Continuer avec les états des pièces	1	49
60	X	H	57	1	Chronogramme	1	49
61	X	J	58	1	La maniere d'identifier l'Aluminium	1	49
62	X	S	59	1	L'histoire de l'aluminium surtout dans le batiment	1	49
63	X	V	60	1	Alliages et Corrosion	1	65
64	X	V	61	1	Shed	1	65
65	X	V	62	1	Rapport écrit 1	1	65
66	X	V	63	1	Diapo	1	65
67							

FIGURE 4. EXEMPLE D'UNE PARTIE DU WBS

2.4. MOYEN DE COMMUNICATION

L'utilisation d'une adresse mail commune : *gmmuseedufer@gmail.com* , nous a permis de pouvoir communiquer rapidement avec les différents tuteurs et aussi des employés de bibliothèques et d'industries tel que les archives départementales ou encore Rio Tinto afin d'obtenir des informations sur le projet. Il a été créé de la même façon un fichier ressource a été créé pour accéder plus facilement aux coordonnées de personnes importantes pour le projet. Ceci permettait à chacun d'entre nous de pourvoir communiquer avec les personnes voulues et de voir l'ensemble des mails des autres membres. Cette démarche permet de tenir tous les membres du groupe au courant de tout avancement dans le projet.

De plus une discussion Facebook nous permettait de se tenir au courant les vendredis matin pour me retard de quelqu'un ou durant les week-ends pour échanger des informations ou même travailler à deux.

PERSONNES RESSOURCES							
Organisation	Contact	Fonction	Adresse	CP	Ville	Tel	Mail
DURAND CIE	Mr DUPONT	Directeur technique	2 rue lartempon	12345	GRANDE VILLE	01 23 45 67 78	dupont@durand.fr
Musée du Fer	Mme LASSERE	Directrice du musée	Avenue du Général de Gaulle	54140	Janville-la-Malgrange		Odile.Lassere@grand-nancy.org
Musée du Fer	Mme DERSON	Conservatrice	Avenue du Général de Gaulle	54140	Janville-la-Malgrange		Sandrine.Derson@grand-nancy.org
Maitre de conférences	Mme HACHEZ-LEROY	Centre recherches historiques	190-198 avenue de France	75244	Paris		florence.hachez-leroy@ehess.fr
Bibliothèque Kandinsky	/	/	Rue Beaubourg	75004	Paris		bibliotheque.kandinsky@centre.pompidou.fr
Archives départementales de Meurthe et Moselle	Mme SAY	Directrice des archives	1 rue de la Monnaie	54052	Nancy	03 83 37 81 11	archives54@departement54.fr
Musée des Beaux-Arts	Mme MANTOPOULOS	Responsable bibliothèque / documentation	Place Stanislas	54000	Nancy	03 83 85 32 87	muriel.mantopoulos@mairie-nancy.fr
Musée des Beaux-Arts	Mr VILLENEUVE DE JANTI	Directeur, conservateur du patrimoine	Place Stanislas	54000	Nancy		charles.dejanti@mairie-nancy.fr
Lycée Jean Prouvé	/	/	53 rue des Bonsecours	54052	Nancy	03 83 35 25 73	oe.0540081@ao-nancy-metz.fr
EEIGM	Mme RENAUX	Tutrice					delphine.veys-renaux@univ-lorraine.fr
EEIGM	Mr ROCCA	Tuteur					emmanuel.rococa@univ-lorraine.fr

FIGURE 5. FICHER DE PERSONNES RESSOURCES

2.5. ORDRE DU JOUR / COMPTE RENDU

Notre sujet de projet ne nous a pas permis de rédiger d'ordre du jour et de compte rendu d'expérience car les structures a étudié au musée du fer sont des structures historiques donc non modifiable. Ceci ne nous a donc pas donné la possibilité de réaliser d'expérience dans des laboratoires d'entreprise et donc de devoir rédiger d'ordre du jour et de compte rendu sur les résultats de l'expérience.

3. POINTS DE VIGILANCE SOLUTIONNES

Au démarrage du projet, la communication n'était pas fluide entre l'ensemble des membres du groupe. En effet, les différences de cultures (espagnole, française, suédoise et marocaine) ont créées une légère déstabilisation au sein du groupe à ses débuts dû à la différence de méthode de travail autant au niveau scientifique qu'au niveau du travail en groupe. En effet, certains préféraient travailler, une fois le travail distribué, seul chez eux dans un endroit calme alors que d'autre préféraient les salles informatiques de l'école afin de travailler en groupe. Tout le monde se retrouvait à 11h20 pour une petite réunion hebdomadaire. Cependant, plus le projet avançait et plus le travail en groupe se faisait ressentir car chacun avait des questions à poser aux autres personnes du groupe qui par messages électroniques était difficile à expliquer, dû aussi à la barrière de la langue.

Un autre point important qui a été solutionné au fur et à mesure de l'avancement du projet est l'emploi du temps de chacun. Durant quelques semaines de l'année et surtout à la période fin mai début juin pour la finalisation du projet, l'emploi du temps a causé des problèmes pour le travail de groupe car il a été dur pour nous de se retrouver tous ensemble ou même par groupe de deux pour travailler. En effet, ayant plus de créneaux bloqués ATI et faisant parti de 4 groupes différents de cours à l'EEIGM, nous avons été obligé de trouver une autre solution car les seul créneaux possible étaient des soirs à 18h30. Par conséquent, la méthode de travail en groupe par vidéo a été utilisée sur la fin du projet pour finir au mieux le projet et de ne pas gâcher les efforts consentis depuis le début de l'année.

Un atout important a été la solidarité de chacun envers les autres durant le projet fasse aux nombreux problèmes rencontrés, surtout dans la deuxième partie du projet. En effet, malgré une communication légèrement froide au début du projet, la solidarité est apparue à un moment important laissant de côté l'éloignement dans le groupe. C'est au moment d'un problème rencontré en milieu de projet que le groupe s'est renforcé. Suite à de nombreuses recherches déjà effectuées, le projet se déroulait de la meilleure des manières, étant en avance sur les objectifs du diagramme de Gantt. Cependant, afin de préconiser une solution d'entretien pour chaque pièce, il fallait trouver les alliages

d'aluminium composant les pièces du XX^{ème} siècle car un entretien dépend du type d'alliage. Après plus d'un mois de recherche, nous avons enfin trouvé les alliages des pièces mais nous avons pris du retard sur le travail à effectuer. Durant cette période, les encouragements de chacun ont été bénéfiques car certains d'entre nous baissaient les bras. Ils ont permis par la suite de rendre le groupe plus solide et de récupérer le retard pris sur le déroulement prévu du projet.

4. RETOUR D'EXPERIENCE

Le projet a permis aux différents membres du groupe d'obtenir de nouvelles connaissances. En effet, nous avons tous appris à gérer son stress dans un projet. De plus, venant d'écoles et surtout de pays différent, chaque membre a entraîné une diversité au niveau des connaissances. Juanjo, étudiant espagnol, avait déjà étudié la corrosion des métaux ainsi que l'utilisation de logiciel de modélisation. Sami, étudiant marocain, possédait les même compétences que Juanjo, il y avait donc l'apport de deux types de connaissances à ce niveau. Hanna, étudiante suédoise, possédait elle plus des connaissances sur l'histoire de l'aluminium et un peu des pièces de Jean Prouvé, grand architecte français. Pour finir Valentin, étudiant français, a étudié le logiciel de modélisation pendant l'année et donc a pu apporter ses connaissances mais surtout au niveau des alliages d'aluminium qu'il a appris via des cours et de lui-même pendant un projet en première année du cycle préparatoire. La diversité des connaissances a donc permis au groupe d'avancer plus rapidement dû au fait que chacun faisait une partie dont il avait les connaissances. Au début du projet, il a été difficile de faire partager ses connaissances aux autres car il y avait un manque de communication qui s'est fortement amélioré et qui a permis au groupe d'apprendre rapidement des points importants du sujet pour sa culture.

La communication dans le groupe restera la chose la plus remarquable du projet. En effet, au début du projet, la communication n'était pas bonne et même avec les tuteurs qui sont là pour nous aider. Avec le temps, chaque membre du groupe a apprécié le projet, surtout à l'approche de la finalisation car les efforts se sentaient payants, et a donc participé à 100% au projet avec une communication parfaite au sein du groupe.

Pour conclure, le projet apportera à chacun un atout majeur lors de l'entrée de chacun dans le monde du travail. En effet, le projet nous a appris de travailler en groupe et surtout de parvenir à un bon esprit de groupe. La communication est le seul moyen de finaliser un projet rapidement lorsqu'il y a une issue possible. Nous avons cru pendant un moment que le projet n'allait jamais se terminer mais nous avons persisté et cela restera une bonne leçon pour l'avenir dans le monde du travail lors de la réalisation de projet.

II. JEAN PROUVE & L'ALUMINIUM

1. BIBLIOGRAPHIE D'UN ARTISTE : JEAN PROUVÉ

Considéré comme une des personnes les plus influentes au niveau du design et de l'architecture en France durant une période de plus de soixante ans, Jean Prouvé a toujours cherché des façons d'intégrer les techniques et les matériaux les plus récents afin de trouver des solutions plus efficaces tant d'un point de vue fonctionnel qu'économie [1]. Fils de Victor Prouvé, artiste de l'Ecole de Nancy, il a grandi sous l'influence des valeurs essentielles du mouvement de l'Art Nouveau, c'est-à-dire l'idée d'incorporer l'industrie dans le monde de l'art ce qui implique la production de séries d'objets d'art afin qu'ils deviennent accessibles à tous [2] [3]. L'innovation a également joué un rôle moteur dans sa carrière :

'Un homme est sur terre pour créer, donc ne jamais copier, ne jamais plagier' [1]

Né à Paris en 1901 et ayant grandi à Nancy, il a comme rêve de devenir ingénieur. Cependant, à cause du manque de moyens financiers dans la famille, il est obligé de commencer un apprentissage en ferronnerie à Paris dès 1916, premièrement dans l'atelier d'Emile Robin puis chez Szabo [4] [5]. A la suite de son service militaire, de 1921 à 1923, il retourne à Nancy pour ouvrir sa propre entreprise [3]. Dans cette entreprise, il commence avec la production d'ouvrages métalliques traditionnels, et puis, en 1924, il conçoit ses premiers meubles [2]. Inspiré par le design des industries automobile et aéronautique, il est attiré par les formes rudimentaires et franches. De plus, le développement de la soudure électrique, de l'acier inoxydable et des diverses techniques de façonnage permettent de montrer qu'il est de cette période. On peut trouver ses premières pièces qui sont définies comme le style typique de Prouvé, il s'agit surtout de son travail avec la tôle d'acier et les structures démontables qui vont recouvrir, avec tous les types de design, les meubles ainsi que plus tard les bâtiments [2].

Pendant la deuxième partie des années vingt et jusqu'en 1931, il crée '*les Ateliers Jean Prouvé*', employant une quinzaine d'employés [6]. C'est à ce moment-là, dans les années trente, que plusieurs de ses meubles sont conçus et que les premiers éléments architecturaux sont fabriqués. Une des commandes les plus importantes vient de l'architecte d'avant-garde Mr. Mallet-Stevens pour l'installation d'un mur rideau pour '*La Maison du Peuple*' à Clichy. Il est constitué d'éléments en tôle métallique pliée. [3]

Il y eut ensuite la seconde guerre mondiale qui rendit l'utilisation de l'électricité limitée tout comme celle de l'acier. Etant données les circonstances, l'atelier de Jean Prouvé est obligé de s'adapter et par conséquent la production des matériaux comme le bois et surtout l'aluminium devient de plus en plus importante [1].

En 1944, Jean Prouvé est élu maire de Nancy pour une courte période mais il quitte son poste après une année pour se consacrer à plein temps à la reconstruction de bâtiments détruits pendant la guerre. Le développement social et l'inclusion de l'art dans la vie quotidienne a toujours été d'une grande importance pour Mr. Prouvé, quelque chose qui l'a conduit à ce travail dans l'architecture et qui se remarque de plus en plus dans ses oeuvres à cette période [1]. Il crée son nouveau 'Atelier de Maxéville', dans la banlieue de Nancy, où plusieurs célèbres architectes contemporains de l'époque viennent pour travailler avec lui. Ici, comme dans tous les ateliers de Mr. Prouvé, l'idée de collaboration est très importante [2]. Il a commencé à travailler avec des maisons démontables, maisons faciles à déplacer et à remonter dans des lieux où le manque de logement se faisait ressentir. Elles sont toutes construites sur une base en acier ou en bois recouverte d'éléments légers, comme des tôles en aluminium. Par exemple, la maison tropicale, conçu en 1949, a été construite pour servir de logement aux colonies françaises en Afrique où il y avait un manque d'infrastructures [5]

A la fin des années 1940, Jean Prouvé est engagé dans une entreprise de production d'aluminium connue sous le nom de 'Aluminium Français', afin de promouvoir l'utilisation de l'aluminium dans le bâtiment. Le projet plus important a été le Pavillon de l'Aluminium, construit en 1954, constitué majoritairement d'aluminium. Néanmoins, à cause du manque de succès des

constructions métalliques, la collaboration entre Jean Prouvé et « Aluminium Français » cesse en 1954 [1]

Après avoir quitté l'atelier à Maxéville, il fonde 'Construction Jean Prouvé', une entreprise dans laquelle il travaille seulement comme designer alors que, auparavant, il travaillait dans tous les cycles de la production d'une pièce [1]. Il reste dans l'entreprise jusqu'en 1966, date à laquelle il décide de créer une entreprise plus petite et de travailler principalement comme expert-conseil. Pendant cette même période, il travaille comme enseignant au Conservatoire National des Arts et Métier à Paris. Il continue d'avoir un grand intérêt pour le développement social et la conception dans l'architecture jusqu'à sa mort en 1984 [6]

Jean Prouvé est une des personnes les plus connues de Nancy, également une icône dans l'architecture en France. Pendant toute sa carrière, Mr. Prouvé faisait partie des institutions les plus influentes au niveau du design et de l'architecture, en travaillant pour ses idées de création. Les trois pièces conçues par Jean Prouvé, évaluées dans ce projet, attestent toutes les trois de tous ses principes de conception : la légèreté de construction (tôles d'aluminium), les éléments préfabriqués et assemblés sur place ainsi que l'efficacité de la construction. Jean Prouvé étant un architecte et constructeur méritant la reconnaissance, ses œuvres méritent des restaurations afin d'être conservées.

2. L'ALUMINIUM

[7] ; [8] ; [9] ; [10] ; [11].

L'Aluminium a été découvert pour la première fois dans les années 1800. En effet, en 1807, le physicien et chimiste britannique Humphry Davy décomposa la soude et la potasse par l'action d'un arc électrique. Ces deux réactifs ont donc servi 20 ans plus tard à la préparation de l'aluminium. L'aluminium est extrait grâce à un procédé chimique appelé : extraction de l'aluminium. Il s'agit, dans ce procédé, d'extraire l'oxyde d'aluminium (alumine, figure 5) de la bauxite dans le but de fabriquer l'aluminium par un procédé d'électrolyse (figure 6). A l'origine, « bauxite » désigne un ensemble de roches alumineuses et ferrugineuses analogues à celles qui furent découvertes aux Baux de Provence d'où le nom actuel de bauxite.

De nos jours, plusieurs procédés ont été créés comme par exemple le procédé Peniakoff Sapeck, le procédé Deville ou encore le procédé Petersen Haglund. Cependant, dans le monde de l'industrie, c'est le procédé inventé par Karl Josef Bayer qui est utilisé (figure 1). Ce procédé fut mis au point en 1894 à l'usine de Gardanne.

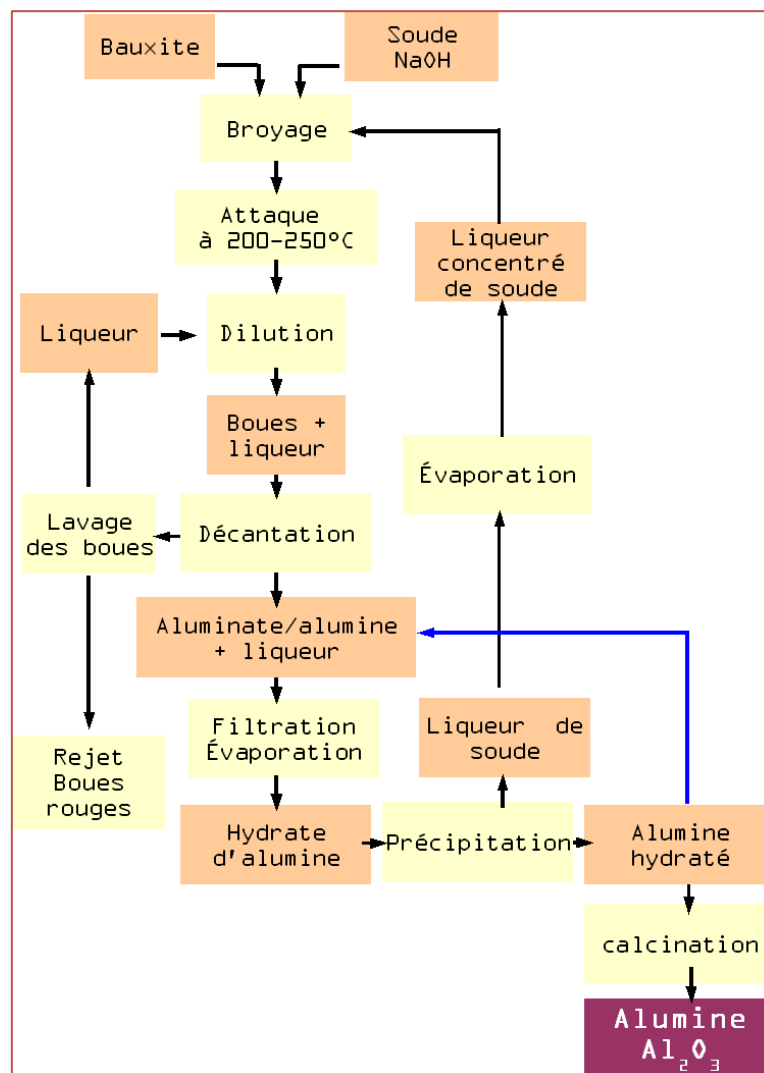


FIGURE 6. PROCEDE BAYER [12]


Il y a 5 étapes importantes lors du procédé Bayer qui sont les suivantes :

1. Le broyage : la bauxite est broyée en fines particules pour faciliter l'extraction ;
2. L'attaque : la bauxite, la soude et la chaux sont mélangées dans des réacteurs à hautes température et pression ;
3. La décantation : séparation de la phase liquide (riche en aluminium) de la phase solide. Les résidus, appelés « boues rouges », sont lavés plusieurs fois. La couleur des résidus provient de la couleur de l'oxyde de fer dû au fer présent dans la bauxite ;
4. La précipitation : refroidissement de la liqueur pour précipiter l'aluminium sous forme d'hydrate d'alumine ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ;
5. La calcination : chauffage de l'alumine à plus de 1000°C afin de le déshydrater.


La bauxite est attaquée par la soude à haute température et sous forte pression. Ensuite, la liqueur obtenue (l'aluminate de sodium) est séparée de ses impuretés, diluée et refroidie. Ceci provoque la précipitation d'oxyde d'aluminium hydraté. Le produit finalement obtenu en bout de cycle est une poudre blanche d'alumine (Al_2O_3).

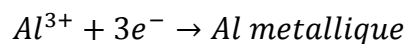
A noter qu'environ 90 pourcents de celle-ci est utilisée pour la production de l'aluminium métallique alors que le restant a plus un usage dirigé vers le traitement de l'eau ou encore la production de verres spéciaux.


Pour finir la production de l'aluminium, l'alumine est versée dans un bain fluoré, afin que la masse volumique de l'aluminium soit supérieur à la solution afin qu'il se dépose au fond de la cuve, porté à une température voisine de 1000°C pour dissoudre la poudre. La cuve est ensuite traversée par un courant électrique de haute intensité. Ce courant, provoque la création d'ions à l'anode qui vont aller se déposer sur la cathode pendant que de l'aluminium liquide se dépose au fond du bain. Ce dernier est très souvent prélevé par siphonage et il est ensuite transporté dans des ateliers de fonderie pour être traité et mise en forme.

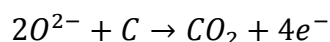
 Dissolution de l'alumine dans un bain fluoré entre 950°C et 1000°C :



 Grâce à un courant électrique continu, dans un électrolyte, entre l'anode (pôle « - ») et la cathode (pôle « + »), l'aluminium se réduit à la cathode :



 A l'anode, oxydation du carbone qui implique un dégagement de CO_2 dans l'atmosphère :



LA REACTION GLOBALE DU PROCEDE

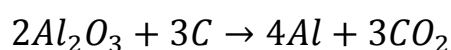


FIGURE 7. REACTION LORS DE L'ELECTROLYSE

Étant rare lors de sa découverte, il a suscité beaucoup d'intérêt et par conséquent a fait son entrée dans le monde de l'industrie en tant qu'accessoire de cuisine. Il a fait son apparition dans le même temps dans l'architecture mais son utilisation resta limitée. Sa première utilisation en Europe a lieu à Rome en 1898 sur une toiture d'église pour remplacer l'acier. En effet, il fut utilisé en substitution aux matériaux lourds car le premier atout mis en avant à cette époque fut la légèreté de celui-ci. Cet atout l'a fait entrer de manière incontournable dans l'architecture. Quelques années après, grâce à sa facilité de nettoyage et sa durabilité, due à une bonne résistance à la corrosion, il entre dans les lieux publics pour différentes utilisations. Il est possible de remarquer que l'utilisation de l'aluminium a considérablement augmenté au XX^e siècle, la production de celui-ci est passée de 6 kt en 1900 à près de 20 000 kt à la fin du siècle.

Les propriétés mises en avant par l'aluminium sont la légèreté, la conductivité thermique et électrique, le traitement de surface, les techniques d'assemblage et pour finir sa bonne résistance à la corrosion. En effet, comme vu précédemment, la légèreté est la propriété la plus évidente lorsque l'on parle d'aluminium. Les alliages d'aluminium ont souvent été appelés "alliages légers" pour cette raison. De manière générale, le gain de poids sur une structure est quasiment de 65% sur une structure en acier, principal alliage métallique utilisé dans le bâtiment avant l'aluminium. En quelques chiffres, la masse volumique de l'aluminium est de 2700 kg.m^{-3} , alors que celle de l'acier est d'en moyenne 7900 kg.m^{-3} . Les domaines qui utilisent l'aluminium pour sa légèreté remarquable sont les domaines du transport, du transport d'énergie et aussi d'un point de vue mécanique tels que les robots. En parlant du domaine du transport d'énergie, l'aluminium commence peu à peu à remplacer le cuivre, meilleur conducteur thermique et électrique des métaux usuels. Les câbles électriques aériens, les câbles téléphoniques souterrains et sous-marins sont des exemples d'application. En effet, l'aluminium non allié possède des conductivités thermique et électrique de l'ordre de 60% et 66% par rapport à celles du cuivre. Si celui-ci est allié, la conductivité va varier suivant les composants ajoutés. De la même manière, la résistance à la corrosion atmosphérique et la résistance au contact de l'eau dépendent des alliages d'aluminium (des composants supplémentaires) qui seront détaillés ci-dessous ainsi que le traitement de surface qui va augmenter la résistance pour certaines familles. Les techniques d'assemblage usuelles telles que le soudage, le collage, le brasage ou encore le rivetage peuvent être utilisées.

Toutes les propriétés intrinsèques à l'aluminium lui permettent d'être utilisé dans de nombreux domaines comme vu précédemment. Sa longue durée de vie, son aspect mieux conservé et l'entretien réduit à lui apporter sont des atouts majeurs. En effet, l'aluminium peut être protégé davantage pour sa sensibilité à la corrosion par l'utilisation de peinture ou plus couramment par anodisation. Les traitements de surface possibles seront détaillés par la suite lors de la recherche de solutions pour la protection des trois pièces.

Pour finir, l'aluminium est le matériau le plus attractif au niveau économique et énergétique lors du recyclage. Lors du recyclage de l'aluminium, les propriétés de celui-ci sont conservées et il possède la capacité d'être recyclable à 100%. L'énergie nécessaire pour le recyclage représente seulement 5% de l'énergie qu'il a fallu fournir pour l'extraction. En quelque chiffre, l'industrie automobile recycle 80% de l'aluminium contre seulement 32% pour les déchets ménagers. Le taux de recyclage global est estimé à environ 50%, cela signifie que la ressource va finir par s'épuiser au fur et à mesure des années.

Propriété	Valeur	Unité	Remarque
Numéro atomique	13		
Masse volumique ρ	2698	$kg.m^{-3}$	pureté comprise entre 99.65% et 99.99%
Température de fusion	660.45	°C	sous $10^5 Pa$
Température d'ébullition	2056	°C	sous $10^5 Pa$
Capacité thermique massique C_p	897	$J.kg^{-1}.K^{-1}$	à 25°C
Conductivité thermique λ	237	$W.m^{-1}.K^{-1}$	à 27°C
Coefficient de dilatation linéique α_l	23.1	$10^{-6}.K^{-1}$	à 25°C
Résistivité électrique ρ	26.548	$10^{-9} \Omega.m$	à 25°C
Module de Young E	69	GPa	
Coefficient de Poisson ν	0.33		

TABLEAU 1. PROPRIETES DE L'ALUMINIUM

2.1. LES ALLIAGES D'ALUMINIUM

Série d'alliage	Elément d'alliage principal
1XXX	99% d'aluminium minimum
2XXX	Cuivre
3XXX	Manganèse
4XXX	Silicium
5XXX	Magnésium
6XXX	Magnésium + silicium
7XXX	Zinc

TABLEAU 2. SERIES D'ALLIAGES DE L'ALUMINIUM

Il existe un large panel d'alliages d'aluminium. En effet, les 8 familles existantes possèdent différentes propriétés, des compositions différentes et aussi des usages de ceux-ci différents. À l'intérieur de chaque famille, les alliages ont sensiblement les mêmes propriétés et aussi au niveau de la résistance à la corrosion. C'est en effet ce critère qui rend quasiment impossible, pour une application donnée, le changement d'alliage inter-famille mais le changement intra-famille reste possible. Il est possible de noter, avec l'avancement de la technologie, que chaque alliage peut être customisé pour une application particulière. L'ajout des différents métaux permet de renforcer les propriétés de l'aluminium qui restent très limitées pour son utilisation à l'état pur dans certains domaines. Cependant, la quantité d'impuretés doit être contrôlée. En effet, une teneur en impuretés trop élevée influe de manière défavorable sur les propriétés de l'alliage. Le dernier paramètre qui peut changer, endommagement exclu, les propriétés d'un alliage est le traitement thermique.

Il existe deux grands types d'alliage d'aluminium : les alliages de moulage et les alliages de corroyage.

Avant de se pencher sur ces deux types d'alliages, il est important de bien comprendre la désignation des alliages afin de les reconnaître dans la littérature. Pour cela, comme vu précédemment, les métaux ajoutés, appelés éléments d'alliage, permettent de fixer pour une famille donnée ses propriétés de base. Ils sont au nombre de cinq avec la possibilité d'ajouter simultanément deux autres éléments, ce qui donnera six systèmes de base pour la métallurgie. Les éléments d'addition, dont la teneur est inférieure à 1% dans la plupart des cas, permettent de manière générale d'affiner les propriétés de chaque alliage.

Pour les alliages de corroyage, la désignation se fait numériquement (code à 4 chiffres) et peut être suivie d'une lettre si celui-ci a éventuellement subi un traitement (tableau 4). Par exemple, les alliages 3XXX sont des alliages au manganèse (tableau 2). Pour finir, la lettre et les 4 chiffres sont précédés du préfixe *EN AW* pour signifier que l'appellation de l'alliage suit bien la norme européenne (EN), qu'il s'agit d'un alliage d'aluminium (A) et pour spécifier l'état métallurgique.

Pour les alliages de moulage, la désignation est plus compliquée. En effet, la désignation peut être faite numériquement (code à 5 chiffres) selon la norme *EN 1780*, mais la plus courante reste la désignation alphanumérique, plus ancienne. Une lettre est attribuée à chaque élément d'alliage ou d'addition selon le tableau 3. Cette lettre est suivie d'un chiffre renseignant sur son pourcentage massique dans l'alliage. Par exemple, l'alliage A-S2GT est un alliage composé de 2% de silicium (S) et d'une faible addition de magnésium (G) et de titane (T). Il est possible d'ajouter à la fin de ce nom, l'état métallurgique de l'alliage (tableau 4) ainsi que son état de livraison.

Désignation	Élément
Be	Béryllium
Z	Zinc
S	Silicium
U	Cuivre
G	Magnésium
M	Manganèse
N	Nickel
C	Chrome
K	Cobalt
T	Titane

TABLEAU 3. ELEMENTS D'ADDITIONS DANS LES ALLIAGES

2.1.1. LES ALLIAGES DE MOULAGE

Les alliages de moulage sont des alliages d'aluminium destinés à être modifiés par des techniques de fonderie. Dans cette famille, deux familles se distinguent. Il y a la famille des alliages de première fusion qui sont élaborés à l'aide de l'aluminium primaire et d'un autre côté la famille de seconde fusion où les alliages sont obtenus par refusion des déchets.

Les alliages de moulage sont principalement utilisés dans le secteur de l'automobile, soit 60%, Ils sont très peu utilisés dans le domaine du bâtiment car les utilisations essentielles après l'automobile sont le transport, l'électricité et la quincaillerie.

Pour donner quelques exemples, la famille 1XXX contient l'aluminium non allié qui est quasiment utilisé exclusivement dans l'électricité. Pour la famille 2XXX, ce sont en majorité des alliages à durcissement structural avec une résistance à la corrosion fortement amoindrie à cause de la forte teneur en cuivre. Pour finir, les alliages de la famille des alliages au magnésium possèdent une bonne résistance à la corrosion atmosphérique, supérieure en milieu marin, mais sont difficiles à couler à cause du magnésium.

En effet, grâce à l'important développement, les alliages sont coulés de manière très précise selon 4 méthodes différentes :

- moulage par gravité en moules en sable (S) ;
- moulage coquille par gravité (K) ;
- moulage sous pression (D) ;
- moulage par gravité à modèle « perdu » (L).

A noter que l'aptitude à se corroder ne dépend en aucun cas de la méthode de moulage.

Cependant le traitement thermique (norme EN 515) peut changer les propriétés de l'alliage et sa résistance à la corrosion. Les différents traitements thermiques et leur désignation sont synthétisés dans le tableau 4.

Traitement thermique	Désignation numérique	Désignation alphanumérique		
		Moulage sable (Y 2X)	Moulage coquille (Y 3X)	Moulage sous pression (Y 4X)
Brut de coulé	F	Y 20	Y 30	Y 40
Recuit (>350°C)	O			Y 41
Refroidissement contrôlé après démoulage et maturation	T1			
Mise en solution, trempé et maturation	T4	Y 24	Y 34	
Refroidissement contrôlé après démoulage et revenu ou sur-revenu	T5	Y 25	Y 35	
Mise en solution, trempe et revenu	T6	Y 23	Y 33	
Mise en solution, trempe et sous-revenu	T64	Y 29	Y 39	
Mise en solution, trempe et sur-revenu	T7	Y 26	Y 36	

TABLEAU 4. TRAITEMENTS THERMIQUES DES ALLIAGES DE MOULAGE

À noter que pour la désignation complète de l'alliage, il est demandé de mettre *EN* pour montrer que l'appellation est conforme à la norme européenne comme vu précédemment, suivi de *A* pour Aluminium et pour finir le nombre à 5 chiffres ou le nom alphanumérique précédé d'une autre lettre suivant son état de livraison :

- B : lingot ;
- C : pièce moulée ;
- M : alliage mère, signifie que l'alliage servira à l'élaboration d'autres alliages.

2.1.2. LES ALLIAGES DE CORROYAGES

Au niveau de l'histoire, *corroyer* est un verbe tiré de l'ancien français du XII^e siècle signifiant la transformation du cuir après le tannage dans le secteur de la peausserie. D'après le *Dictionnaire historique de la langue française*, il signifie, depuis la fin du XVII^e siècle, « souder à chaud » ou encore « battre ».

La famille des alliages d'aluminium de corroyage peut être découpée en deux familles distinctes autant au niveau des propriétés que de la fabrication :

- les alliages à durcissement structural ;
- les alliages à durcissement par écrouissage.

En effet, tous les métaux sont durcissables par écrouissage mais la désignation *par écrouissage* sera réservée aux alliages non susceptibles de répondre à un durcissement structural.

2.1.1.1. ALLIAGES A DURCISSEMENT STRUCTURAL

Cette partie des alliages concerne les familles 2000, 6000 et 7000.

Les alliages subissent 3 étapes dont les paramètres T (température) et t (temps) sont propres à chaque alliage et sont renseignés dans la littérature dans des tableaux contenant des valeurs précises. Les trois étapes sont :

- Chauffage à haute température (mise en solution) ;
- Refroidissement rapide (trempe) ;
- Maintien : soit autour de 20°C (maturation) ou soit à 100°C/200°C (revenu).

Pour le chauffage à haute température, comme vu précédemment, chaque alliage possède sa propre température. Cependant, cette étape est importante car les propriétés de celui-ci vont être changées si la température n'est pas assez proche de la température théorique. En effet, pour une température inférieure, les propriétés mécaniques sont réduites et pour des températures plus élevées, le matériau est dégradé.

Suit cette étape le refroidissement rapide par une mise en solution du matériau après un temps très court. La vitesse de celle-ci doit être importante mais elle dépend quand même de la trempe utilisée. Il existe trois différentes trempes qui sont l'immersion du matériau dans l'eau, le soufflage à l'air du matériau ainsi que l'aspersion de celui-ci. Cependant, chaque alliage possède une vitesse caractéristique de trempe qui est une vitesse critique. En effet, une vitesse supérieure à cette vitesse critique permet d'obtenir des propriétés mécaniques maximales. Si l'épaisseur est élevée, il peut exister une différence de propriétés entre le cœur et la surface, par conséquent il est possible de déformer plastiquement, comme un laminage, permettant de réduire les contraintes internes au matériau induit par la trempe.

À noter que la résistance à la corrosion des alliages dépend de la vitesse de trempe.

Ensuite, la maturation à température ambiante, pour laquelle la durée est propre à l'alliage, entraîne une diminution de la capacité de déformation. Pour une température élevée, soit le revenu, il

Il y a une augmentation des propriétés mécaniques due à la forte précipitation des éléments durcissants (composés intermétalliques) si les conditions de température et de temps sont respectées. En effet, elles sont propres aux alliages ainsi qu'au laps de temps entre la trempe et le revenu.

Lors du revenu, il existe un temps pour lequel les résistances mécaniques sont maximales. Il correspond à l'état T6 (tableau 4). Pour un temps inférieur, il s'agit du sous-revenu qui permet de maintenir les capacités de déformations plastiques de l'alliage et aussi sa capacité de mise en forme. Un point qui pourrait nous intéresser par la suite est le fait que pour un alliage ayant subi un sous-revenu, sa résistance à la corrosion est plus faible que pour un alliage ayant subi un sur-revenu. Le sur-revenu correspond à un revenu dont le temps excède le temps du pic de résistance maximal.

Afin d'améliorer la capacité de résistance à la corrosion de certains alliages, dont la résistance de départ est très faible, il est possible de procéder à un revenu à deux étapes. Il s'agit d'un « double revenu » composé de (tableau 5):

- un état qui optimise la résistance à la corrosion (T 73) ;
- un état qui permet de trouver un compromis entre les résistances mécaniques maximales et une bonne résistance à la corrosion (T 76).

LES ETATS METALLURGIQUES

Il est possible de compléter le nom de l'alliage par l'état métallurgique que subit celui-ci. Pour les alliages à durcissement structural, les états sont désignés par la lettre T qui est suivie par une combinaison de chiffres allant de un à cinq chiffres. Le nombre de traitement thermique (T) est important et conforme à la norme *EN 515* et est synthétisé dans le tableau 5. La température et le temps des différentes manipulations sont différents pour chaque alliage.

Etat	Mise en solution	Traction contrôlée	Ecrouissage	Maturation	Revenu	Sur-revenu	Filé
T1				•			•
T3	•		•	•			
T351	•	•		•			
T3510	•	•		•			•
T3511	•	•		•			•
T4	•			•			
T451	•			•			
T4510	•			•			•
T4511	•			•			•
T5					•		•
T6	•				•		•
T651	•	•			•		
T6510	•	•			•		•
T6511	•	•			•		•
T73	•					•	

T7351	•	•				•	
T73510	•	•				•	•
T73511	•	•				•	•
T76	•					•	
T76510	•	•				•	•
T76511	•	•				•	•
T8	•		•		•		
T8510	•	•			•		•
T8511	•	•			•		•

TABLEAU 5. TRAITEMENTS THERMIQUES DES ALLIAGES DE CORROYAGE

2.1.1.2. ALLIAGES A DURCISSEMENT PAR ECROUISSAGE

Les alliages appartenant à cette famille sont les alliages des familles 1000, 3000, 5000 et 8000.

Le durcissement par écrouissage implique de déformer plastiquement le matériau par l'application d'une contrainte à froid contrairement aux alliages à durcissement structural. La déformation plastique engendre une modification au niveau de la structure du matériau et donc un durcissement de celle-ci qui se traduit par une augmentation de la résistance mécanique et de la dureté au détriment de la ductilité, qui correspond à la capacité d'un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre. Cette contrainte est appliquée soit pendant la fabrication par laminage, par étirage, etc., soit au cours de la mise en œuvre par exemple lors du formage ou encore du pliage.

À noter que les propriétés mécaniques et par conséquent la résistance mécanique ainsi que la dureté varient selon les familles. En effet, la famille 5000, ayant pour élément principal le magnésium, possède des capacités mécaniques supérieures à celles des autres familles. Cependant, il existe un seuil à partir duquel la déformation devient impossible et par conséquent il faut appliquer des traitements thermiques aux alliages afin de poursuivre le durcissement.

Il est possible d'adoucir le durcissement grâce à un recuit dont la température et la durée dépendent de l'alliage ainsi que de son état après l'écrouissage. Il existe des conditions standards de recuit bien précises pour chaque famille qui permet soit un adoucissement partiel (restauration) soit un adoucissement complet (recristallisation) qui engendre une réorganisation complète de la structure.

LES ETATS METALLURGIQUES

Avec la norme définie précédemment, *EN 515*, il existe 3 états métallurgiques principaux pour les alliages à durcissement structural :

- F : brut de fabrication ;
- O : recuit ;
- H : durci par écrouissage ;

Cependant, il existe plusieurs états H qui sont désignés de manière générale par deux chiffres même s'il existe quelques états désignés par trois chiffres.

Dans un premier temps, lorsqu'il y a deux chiffres, les états s'écrivent sous la forme HX_1X_2 . Les deux chiffres suivant le H représentent différents traitements (tableau 6).

X ₁ =1		X ₁ =2		X ₁ =3			
Etat écroui		Etat restauré (écroui + recuit partiellement)		Etat stabilisé (écroui + traité thermiquement à basse température ou par échauffement)			
X ₂ =2		X ₂ =4		X ₂ =6		X ₂ =8	
Etat quart-dur (écrouissage de l'ordre de 12%)		Etat demi-dur (écrouissage de l'ordre de 25%)		Etat trois quarts-dur (écrouissage de l'ordre de 50%)		Etat quatre quarts-dur (écrouissage de l'ordre de 75%)	

TABLEAU 6. DIFFERENTS TRAITEMENT PAR ECROUISSAGE

Pour le premier chiffre égal à 3, il se réfère quasiment seulement aux alliages de la famille des 5000.

À noter que le deuxième chiffre renseigne le degré final d'écrouissage que l'on caractérise grâce à une résistance à la traction minimale. Le niveau des caractéristiques mécaniques augmente avec le chiffre. Cela revient donc à diviser en quatre l'intervalle entre la plus grande valeur de R_m (pour écrouissage maximal) et la plus petite qui correspond à celle de l'état recuit. Cependant, il existe le chiffre 9 qui correspond tout simplement aux états dont R_m est supérieure à celle des HX8.

Ensuite pour les états correspondant aux trois chiffres, on a pour les plus fréquents (tableau 7) :

Etat H111	Etat H112	Etat H116
Recuit + planage	Transformation à chaud ou déformation à froid limitée	Teneur de magnésium supérieure à 4% pour la famille des 5000

TABLEAU 7. DIFFERENTS TRAITEMENT PAR ECROUISSAGE

Chaque état possède ses caractéristiques mécaniques que l'on peut trouver dans la littérature.

2.2. METHODES DE CARACTERISATION

Dans cette partie sont détaillées des méthodes de caractérisation. Cependant, dans ce projet, les pièces étant classées aux monuments historiques de France, il n'est pas autorisé de prélever un échantillon de l'alliage et de pouvoir le caractériser. Par conséquent, la partie suivante concernera les recherches bibliographiques pour l'obtention des noms des alliages utilisés dans les pièces.

2.2.1. SDL

La méthode SDL (Spectroscopie à décharge lumineuse) est une technique amplement utilisée pour caractériser la composition globale du matériau analysé en surface d'un échantillon. Le principe est basé sur l'érosion de la surface dû à une pulvérisation ionique puis à l'analyse des photons émis lors de la relaxation des atomes pulvérisés (figure 7).

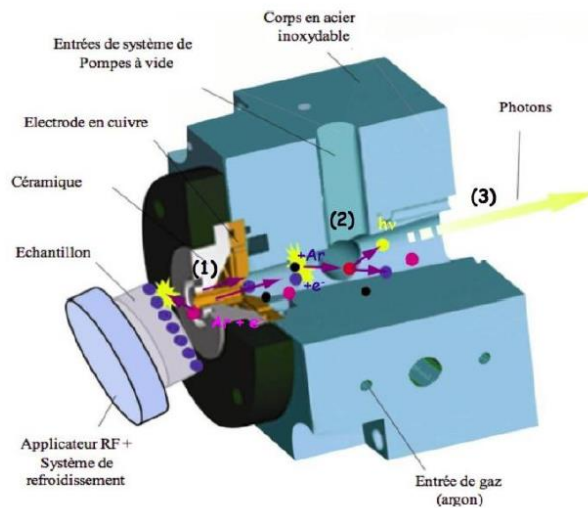
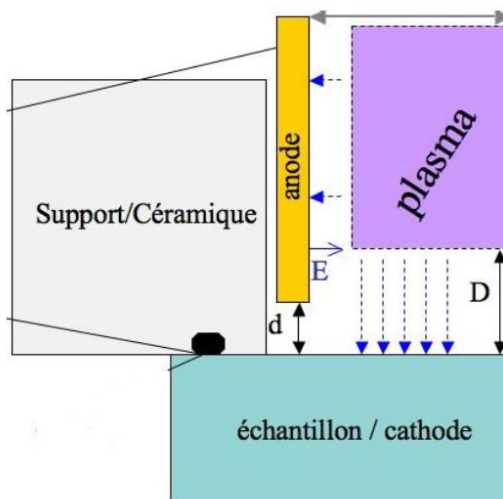


FIGURE 8. SCHEMA MONTRANT LA DISPOSITION DES DEUX ELECTRODES ET COUPE EN 3D DE L'APPAREIL [13]

Ensuite, les résultats peuvent être analysés avec deux techniques, GDOS (*Glow Discharge Optical Spectroscopy*) (figure 8) et GDMS (*Glow Discharge Mass Spectrometry*) (figure 9), soit en français, spectroscopie optique de décharge lumineuse et spectroscopie massique de décharge lumineuse.

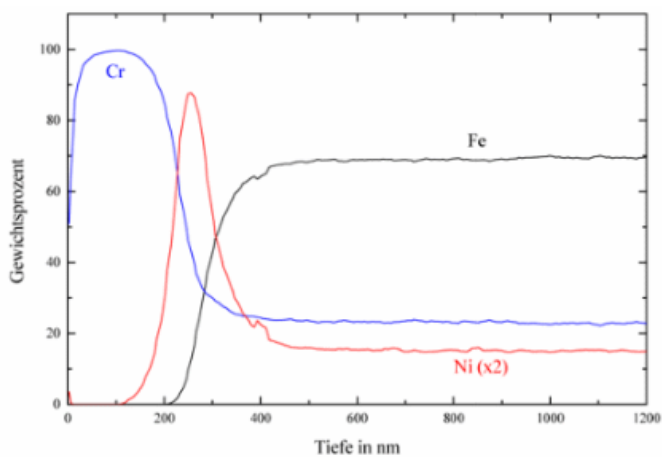


FIGURE 9. ANALYSE GDOS [14]

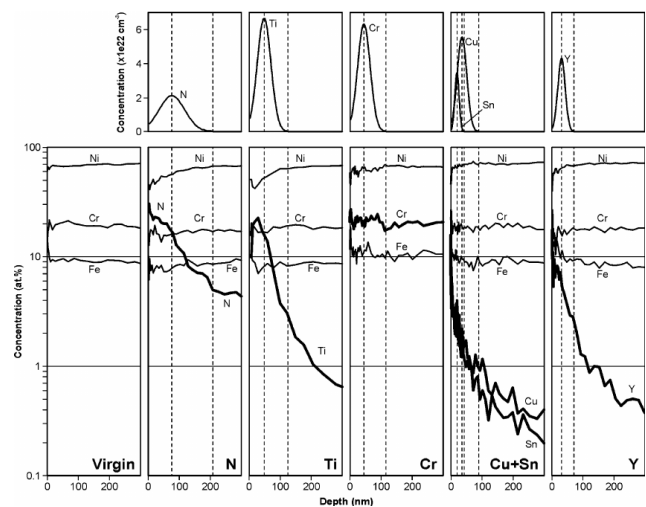


FIGURE 10. ANALYSE GDMS [15]

Les avantages de cette méthode sont la facilité et la rapidité de ces essais. Elles sont très utilisées chez les fournisseurs mais avec l'inconvénient de détruire l'échantillon pour obtenir des résultats comme sur la figure 10.

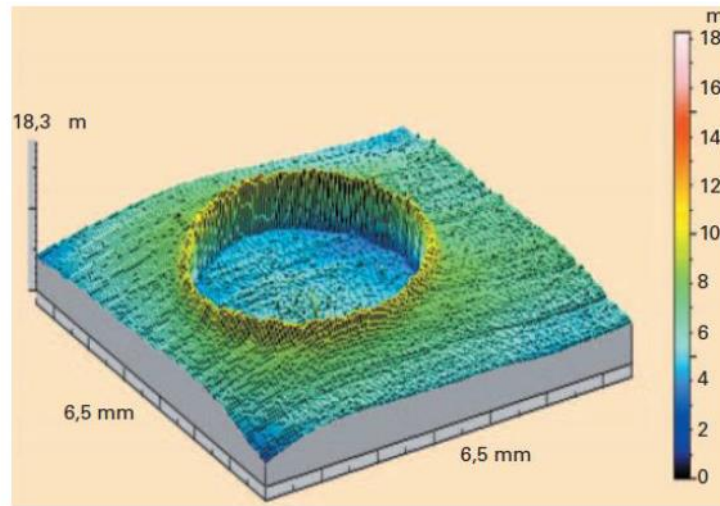


FIGURE 11. CRATERE A LA SURFACE D'UN ECHANTILLON [16]

2.2.2. LIPS

Laser-induced plasma spectroscopy (LIPS) est basé sur le même principe que la SDL ci-dessus (tout autant destructif) mais pour cette méthode, la source d'énergie est un laser de haute énergie. Ensuite, avec une analyse spectroscopique (figure 11), il est possible de caractériser l'état élémentaire du matériel.

L'avantage de cette méthode est que le dispositif peut être portable mais, en contrepartie, le dispositif n'est pas aussi précis qu'avec une pulvérisation ionique (SDL).

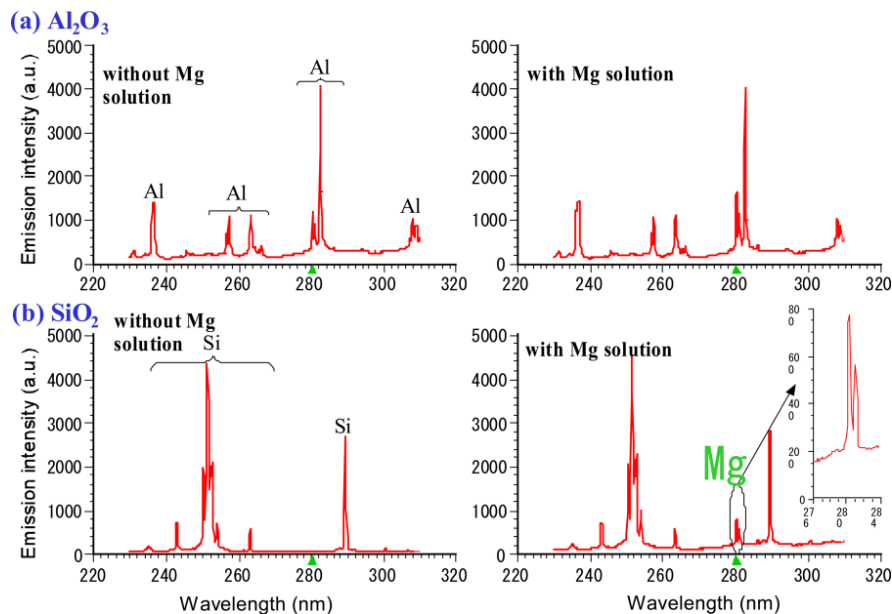


FIGURE 12. SPECTRE D'EMISSION A ANALYSER [17]

2.2.3. MICROSCOPIE OPTIQUE

Avec un système de lentilles, on peut déterminer la microstructure du matériau (figure 12) en caractérisant son processus de refroidissement thermique, les défauts, les grains, les différents

matériaux et les différentes phases dans le matériau. On ne peut malheureusement pas identifier tous les additifs de l'alliage.

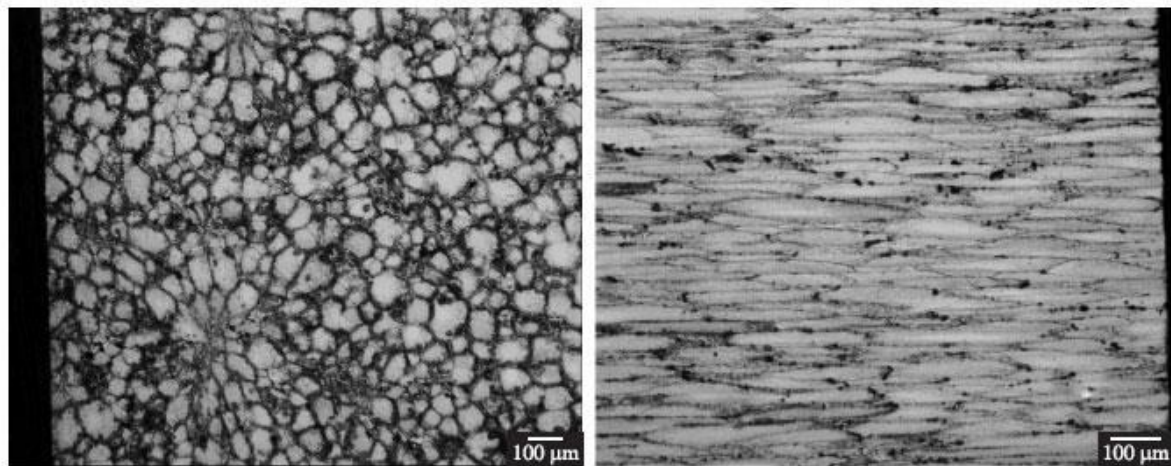
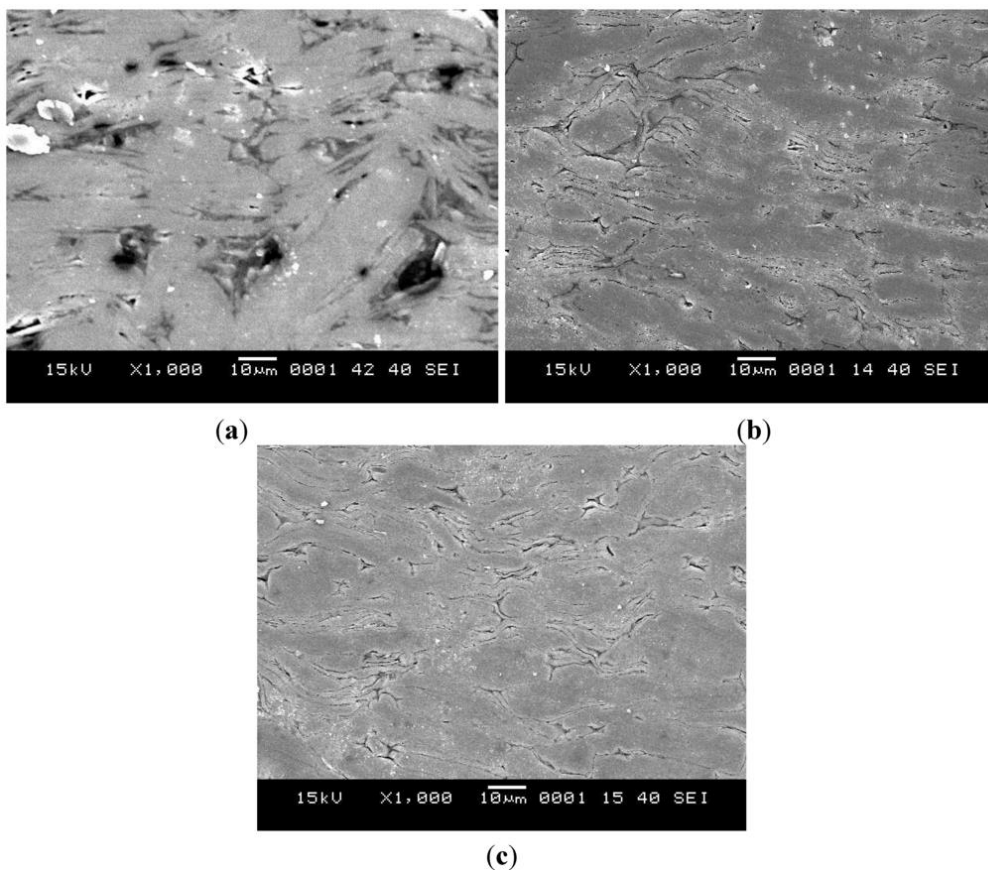


FIGURE 13. IMAGERIE DE STRUCTURE D'UN MATERIAU OBSERVE AU MICROSCOPE OPTIQUE

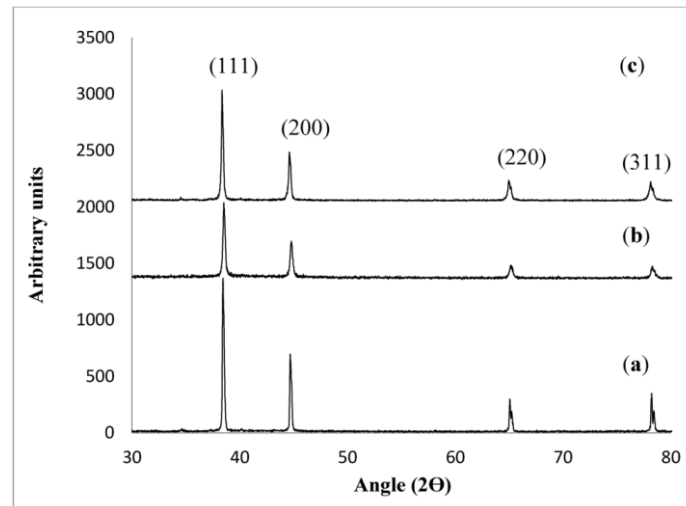
2.2.4. MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE



Imageries microscope MEB – échantillon d'aluminium avec 1% massique de SiC compacté à (a) 550 °C, 5 min, 200 °C/min, 20 MPa; (b) 550 °C, 5 min, 200 °C/min, 50 MPa; (c) 550 °C, 5 min, 300 °C/min, 50 MPa.

FIGURE 14. IMAGERIE DE STRUCTURE D'UN MATERIAU OBSERVE AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE

2.2.5. DIFFRACTION DE RAYONS X



Spectres rayon X pour (a) Al pur, (b) échantillon d'Al avec 1% massique de SiC broyé pendant 24 h et (c) compacté à 600 °C pendant 10 min en utilisant une pression de 50 MPa et une vitesse de chauffage de 200 °C/min.

FIGURE 15. DIFFRACTOGRAMME D'UN MATÉRIAU

2.3. LES ALLIAGES UTILISES DANS LES PIECES

Pour commencer, la plupart des alliages utilisés dans le bâtiment appartiennent à quelques familles de ceux-ci (tableau 2) car, comme vu précédemment, les propriétés diffèrent de manière importante selon les familles. En effet, les alliages les plus utilisés, pour leur application dans le bâtiment, appartiennent aux familles 3XXX, 5XXX et 6XXX. Il s'agit des alliages composés respectivement en majorité de manganèse, magnésium et magnésium plus silicium.

Cependant, la documentation technique sur les pièces de Mr. Prouvé à traiter est très limitée, ce qui pose problème pour l'obtention des noms des alliages constitutifs de celles-ci. Néanmoins, le pavillon du centenaire de l'aluminium serait composé des alliages AG3 et ASG.

Afin de chercher les alliages pouvant constituer le portique d'Orly, les recherches se sont poursuivies sur d'autres installations créées par Jean Prouvé dans les mêmes années comme par exemple la maison « Standard » datant années 1949-1950. Cette maison fut construite avec les alliages AG3 et AG5. Il est possible de remarquer que Jean Prouvé a utilisé les mêmes alliages durant les années 50 ce qui permettra de supposer que le portique d'Orly ainsi que le Pavillon du centenaire de l'aluminium sont constitués des mêmes alliages. Il s'agit, de manière générale, des alliages des familles 5XXX et 6XXX. [18]

2.3.1. LES ALLIAGES DE LA FAMILLE DES 5XXX

Les alliages 5XXX sont les alliages d'aluminium composés majoritairement de magnésium. Il faut noter que les alliages de magnésium sont très recherchés pour leur bonne usinabilité mais avant tout pour leur forte résistance à la corrosion.

Il est possible de trouver la constitution des alliages AG3 et AG5 grâce aux fiches techniques des alliages. L'alliage AG3 (tableau 8), utilisé par Jean Prouvé pour les tôles constituant le Pavillon du centenaire de l'aluminium, est constitué de manière générale avec les mêmes métaux que l'AG5 (tableau 9) mais dont la proportion en magnésium change. Il passe de 3% pour l'AG3 à 5% pour l'AG5.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Remarques	Ti	Autres		Al
									Chaque	Total	
0.4	0.4	0.1	0.5	2.6-3.6	0.3	0.2	0.1-0.6 Mn+Cr	0.15	0.05	0.15	Reste

TABLEAU 8. COMPOSITION DE L'ALLIAGE AG3 [19]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Remarques	Ti	Autres		Al
												Chaque	Total	
0.4	0.4	0.1	0.4-1.0	4.0-4.9	0.05-0.25	-	0.25	-	-	0.1-0.6 Mn+Cr	0.15	0.05	0.15	Reste

TABLEAU 9. COMPOSITION DE L'ALLIAGE AG5 [20]

L'alliage AG3 utilisé par Jean Prouvé ainsi que l'AG5 étaient des alliages demi dur. Cette appellation (tableau 6) permet de remarquer que l'alliage a été durci par écrouissage (état H14) avant son utilisation. Il est donc possible d'avoir, grâce une fiche caractéristique de l'alliage, les propriétés mécaniques de celui-ci (tableau 10). Cependant, les propriétés mécaniques varient selon que la pièce est un tube, une tôle ou encore une barre. Par conséquent, les propriétés énoncés ci-dessous correspondent aux propriétés pour les tôles qui étaient les plus utilisées par Jean Prouvé.

Etat	Epaisseur spécifiée		Rm (Mpa)		Rp _{0,2} (MPa)		A %		Dureté HBS
	Supérieur à	Jusqu'à	Mini	Maxi	Mini	Maxi	A ₅₀	A	
H14	0.2	0.5	240	280	190	-	3		72
	0.5	1.5	240	280	190		3		72
	1.5	3.0	240	280	190		4		72
	3.0	6.0	240	280	190		4		72
	6.0	12.5	240	280	190		5		72
	12.5	25.0	240	280	190			5	72

TABLEAU 10. PROPRIETES MECANQUES DE L'ALLIAGE AG3 [19]

Avec Rm la résistance à la traction qui correspond à la charge maximale supportée par l'éprouvette, Rp_{0,2} la limite conventionnelle d'élasticité à 0.2% et A l'allongement pour-cent après rupture.

De la même manière, il est possible d'obtenir celle de l'alliage remplaçant l'AG5 (tableau 11).

Etat	Epaisseur spécifiée		Rm (Mpa)		Rp _{0,2} (MPa)		A %		Dureté HBS
	Supérieur à	Jusqu'à	Mini	Maxi	Mini	Maxi	A ₅₀	A	
H14	0.2	0.5	340	400	280	-	2		102
	0.5	1.5	340	400	280		3		102
	1.5	3.0	340	400	280		3		102
	3.0	6.0	340	400	280		3		102
	6.0	12.5	340	400	280		4		102
	12.5	25.0	340	400	280			3	102

TABLEAU 11. PROPRIETES MECANQUES DE L'ALLIAGE AG5 [20]

Il est possible de remarquer que les propriétés mécaniques de l'AG5 sont supérieures à celles de l'AG3. En effet, ceci est dû au pourcentage de magnésium en plus dans l'AG5 qui vient renforcer les propriétés de l'aluminium possédant des propriétés mécaniques faibles.

Comme énoncé précédemment, les alliages d'aluminium possèdent une bonne résistance à la corrosion. Il est donc possible, avec les fiches techniques, de voir que leur résistance à la corrosion est très bonne (tableau 12 et 13). Il sera possible de comparer celle-ci avec celle d'un alliage magnésium plus silicium (tableau 16).

Indice de corrosion général	Très bon
Corrosion en atmosphère industrielle	Très bon
Corrosion en atmosphère marine	Très bon
Corrosion en atmosphère rurale	Très bon
Corrosion sous contrainte	Très bon
Indice d'exfoliation	Très bon
Corrosion granulaire	Bon
Résistance à la piquation	Très bonne

TABLEAU 12. RESISTANCE A LA CORROSION DE L'ALLIAGE AG3 [19]

Indice de corrosion général	Très bon
Corrosion en atmosphère industrielle	Très bon
Corrosion en atmosphère marine	Très bon
Corrosion en atmosphère rurale	Très bon
Corrosion sous contrainte	Bon
Indice d'exfoliation	Très bon
Corrosion granulaire	Bon
Résistance à la piquation	Très bonne

TABLEAU 13. RESISTANCE A LA CORROSION DE L'ALLIAGE AG5 [20]

2.3.2. LES ALLIAGES DE LA FAMILLE DES 6XXX

Un autre type d'alliage utilisé souvent dans le bâtiment est la famille des 6XXX. En effet, Jean Prouvé a utilisé l'alliage ASG dans le Pavillon du centenaire de l'aluminium pour former les poteaux. Il a dans un premier temps fabriqué des tôles qu'il a ensuite soudées pour former des tubes. Il s'agit d'un alliage contenant principalement du silicium et du magnésium, du type 6082 appelé aussi AW- AlSi1MgMn (tableau 14).

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Autres		Al
								Chaque	Total	
0.7-1.3	0.5	0.1	0.4-1.0	0.6-1.2	0.25	0.2	0.1	0.05	0.15	Reste

TABLEAU 14. COMPOSITION DE L'ALLIAGE ASG [21]

Jean Prouvé utilisait l'alliage ASG ayant subi un traitement du type filé-trempé-revenu. Il est possible de constater avec le tableau 5 que le traitement approprié est le T6. De la même manière que précédemment, il est donc possible, avec la fiche technique de l'alliage, de récolter pour une structure du type tôle les propriétés mécaniques de l'alliage (tableau 15).

Etat	Epaisseur spécifiée		Rm (Mpa)		Rp0,2 (MPa)		A %		Dureté HBS
	Supérieur à	Jusqu'à	Mini	Maxi	Mini	Maxi	A ₅₀	A	
T6	> 0.4	1.5	310	-	260	-	-	6	94
T651	1.5	3.0	310		260			7	94
	3.0	6.0	310		260			10	94
T62	6.0	12.5	310		260			9	94

TABLEAU 15. PROPRIETES MECANQUES DE L'ALLIAGE ASG [21]

En comparaison avec les deux alliages de la famille des 5XXX, les propriétés mécaniques de celui-ci, résistance mécanique et dureté se situent entre les deux traités précédemment. Ils ont donc des comportements mécaniques similaires. Cependant, la différence avec les alliages de magnésium se situe au niveau de la résistance à la corrosion. En effet, celui-ci possède une tenue à la corrosion inférieure (tableau 16) due à la présence de silicium en plus grande quantité mais en contrepartie, la présence de celui-ci entraîne une meilleure coulabilité de l'alliage et une diminution du coefficient de dilatation.

Une autre différence entre ces deux alliages est la criquabilité. Les criques sont des cavités ou fissures de surface dues au retrait linéaire (contraction) lors de la solidification. Elles sont plus importantes pour un alliage au magnésium que pour les alliages au silicium.

Indice de corrosion général	Bon
Corrosion en atmosphère industrielle	Bon
Corrosion en atmosphère marine	Bon
Corrosion en atmosphère rurale	Très bon
Corrosion sous contrainte	Bon
Indice d'exfoliation	Bon
Corrosion granulaire	Bon
Résistance à la piquation	Bonne

TABLEAU 16. RESISTANCE A LA CORROSION DE L'ALLIAGE ASG [21]

Par la suite, les problèmes de dégradation des pièces seront traités en tenant compte de ces trois alliages ainsi que les solutions proposées seront adéquates à ceux-ci.

3. DEGRADATION DE L'ALUMINIUM EN CONDITIONS ATMOSPHERIQUES

Les problèmes les plus communs dans l'aluminium sont, la corrosion, l'oxydation et les effets atmosphériques et temporels présents sur la pièce. Lorsqu'il est soumis à ces effets, le matériau se dégrade de plus en plus avec le temps. Les problèmes vus dans cette partie seront la corrosion, la saleté, les défauts structuraux et les facteurs externes qui peuvent provoquer ces effets.

3.1. LA CORROSION

La corrosion est la détérioration d'un matériau due à l'attaque électrochimique d'éléments présents dans son environnement (figure 15). La corrosion se produit car le matériau cherche son état le plus stable (ou de sous énergie). Elle dépend de la température, de la salinité du fluide en contact avec le métal et des propriétés du métal. De même, la corrosion dépend aussi de la pièce manufacturée.

La corrosion se produit parce qu'il y a un flux massif électrique généré par la différence de potentiel chimique entre les espèces impliqués.

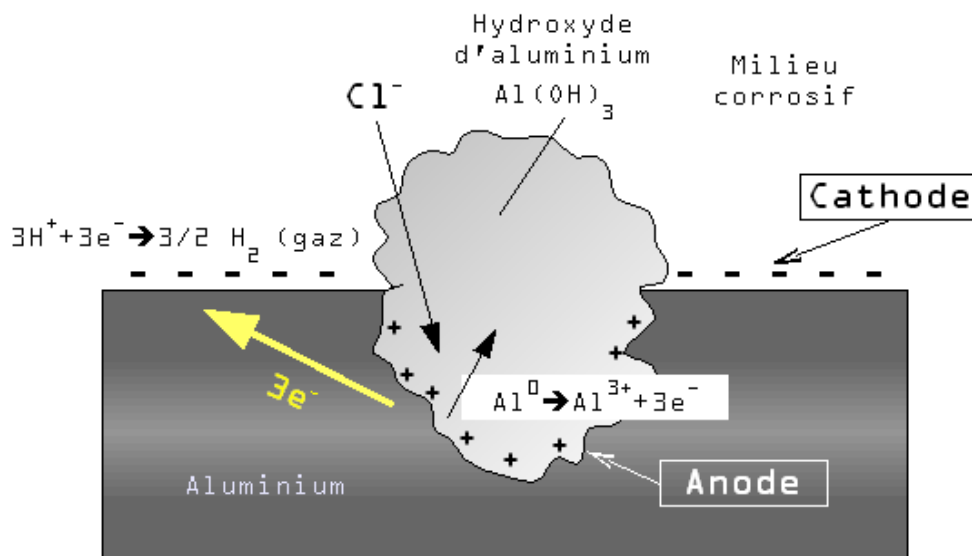


FIGURE 16. SCHEMA DE CORROSION PAR PIQURE DANS UN ECHANTILLON D'ALUMINIUM [22]

3.1.1. CORROSION GALVANIQUE

La corrosion galvanique est un processus électrochimique qui se développe quand un métal est en contact avec un autre métal plus noble dans un électrolyte ou dans un environnement humide. Il se produit donc dans ce cas une réaction appelée corrosion sur le métal comme sur la figure 16.

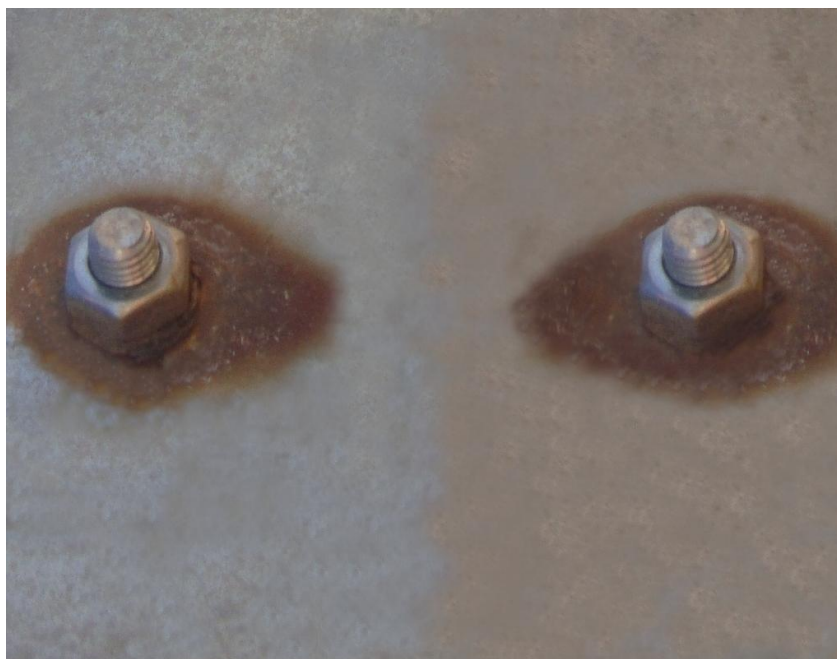


FIGURE 17. EXEMPLE DE CORROSION AU NIVEAU DE VIS ET BOULONS

Elle se produit car, lorsque que deux métaux de nature différente se touchent dans un électrolyte, il y a la formation d'une différence de potentiel et donc d'un couple anode/cathode. Il y a ensuite dû à la différence de potentiel une migration d'ions de l'anode à la cathode se produit. La corrosion au niveau des métaux est plus rapide du côté de l'anode que de la cathode.

Il est important de savoir que les métaux peuvent se corroder même si il y a une différence de composition chimique dans le métal.

Pour finir, la corrosion galvanique est fonction de l'aération de l'élément en question.

3.1.2. CELLULE DE CONTRAINTES

Ce type de dégradation se produit principalement par action galvanique mais peut se produire aussi par la infiltration d'impuretés dans une fissure. Avec l'oxydation dans la fissure et la contrainte appliquée sur le matériau, une rupture peut avoir lieu.

3.1.3. CORROSION MICROBIOLOGIQUE

Il s'agit de la dégradation du matériau (en forme de corrosion) due à l'action de micro-organismes biologiques présents dans l'eau (ou l'environnement). La biodiversité qui cause ce type d'attaque peut être des bactéries ou encore des algues.

Cette corrosion est probablement une cause possible de la dégradation des pièces à cause de l'humidité élevée de la région.

3.1.4. CORROSION DUE A L'HETEROGENEITE DU MATERIAU

Comme vu précédemment, la microstructure interne du matériau (ségrégations, structures, potentiel chimiques internes, etc..) peut provoquer des effets sur la corrosion galvanique interne.

3.1.5. CORROSION PAR AERATION DIFFERENTIELLE

La corrosion par aération se produit sur les surfaces planes là où l'humidité et la saleté sont les plus présentes. Le métal se dégrade préférentiellement dans les zones non aérées. Il s'agit de l'effet Evans.

3.1.6. CORROSION PAR EROSION

Cette corrosion se produit par l'effet d'un agent corrosif qui bouge sur une surface métallique et accélère les effets destructifs par érosion mécanique. Ceci est un effet très important et difficile à déterminer. Par exemple, l'effet des particules de sable dans le vent impactent sur la surface et produit une érosion des particules d'oxyde externe qui protègent le matériau et donc la corrosion détruit le matériau. L'aspect de cette érosion est la présence de petites bulles dont la forme varie fonction du vent ou du fluide.

4. FACTEURS ATMOSPHERIQUES QUI AFFECTENT LES MATERIAUX

Les facteurs déterminés, dans le tableau 17, représentent une liste composée des facteurs les plus importants qui ont été divisés selon divers effets pour aborder de manière plus précise ceux-ci.

Facteur	Effet
EFFET THERMIQUE	
Irradiation thermique solaire	Energie pour processus thermodynamiques
Température ambiante	Energie pour processus thermodynamiques
Gradient thermique	Dilatation et contraction des matériaux
EFFET CHIMIQUE	
Composition chimique atmosphérique	
Air	Eléments oxydants, corrosifs, attaques...
Eau de pluie	Eléments oxydants, corrosifs, attaques...
Effets microbiologiques	Attaques microbiologiques structurales
Composition chimique atmosphérique	Redox/Corrosion
Contact entre matériaux	Redox/Corrosion
EFFET MECANIQUE	
Vent	Charges structurales des déformations
Sédiments	Impacts sur la microstructure
Pluie	Micro-impacts sédimentaires
Neige	Contractions forcées et contraintes
Grêle	Impacts structuraux
Vibrations sismiques	Vibrations mécaniques ; contraintes
Poids (propre ou externe)	Contraintes
EFFET DU TEMPS	
Vieillessement des matériaux	Change la microstructure
EFFET HUMAIN	
Spectateurs	Petites défauts

TABLEAU 17. FACTEURS QUI AFFECTENT LES MATERIAUX

5. PROBLEMES ET SOLUTIONS TRADITIONNELLES EXISTANTS POUR L'ALUMINIUM

5.1. SALETE ET NETTOYAGE D'ATTAQUES MICROBIOLOGIQUES

[23] ; [24] ; [25] ; [26] ; [27] ; [28]

L'aluminium est un métal qui possède une bonne résistance à la corrosion sous condition atmosphérique même dans des conditions désastreuses. Un nettoyage régulier des pièces s'impose quand même pour garder l'aluminium en bon état.

Il faut être très soigneux avec la couche d'oxyde natif de 3 à 10 nm afin de ne pas la détruire. Pour cela, il faut utiliser des produits chimiques en trouvant un compromis entre acidité et basicité pour ne pas attaquer de manière trop importante la surface ou même le cœur de l'aluminium.

Il est tout de même très important de caractériser le type de surface de l'aluminium. Il ne faut pas oublier que l'entretien est un traitement superficiel.

Les différents types de traitements surfaciques afin de changer les caractéristiques les plus communes de l'aluminium sont:

- Aluminium anodisé
- Aluminium laqué
- Aluminium brute

La couche d'aluminium anodisé est formée d'alumine sur une épaisseur de 10 à 20 microns.

Les informations, dans les tableaux 18 et 19, renseignent sur l'agressivité des différents produits chimiques sur les différentes surfaces. Avec ce tableau, il est possible de faire une première estimation des différents types de produits pouvant entretenir une surface d'aluminium. Cependant, il ne faut pas se fier totalement à ces estimations car si l'environnement où se situe la pièce est plus acide qui habituellement, un produit non agressif en temps normal pourrait détruire la surface du métal. Pour éviter cette mésaventure, il faudrait dans un premier temps nettoyer un échantillon de l'alliage d'aluminium en question afin de tester le produit de nettoyage pour ensuite nettoyer la structure entièrement sans risque de détérioration.

Produits	Effets sur l'aluminium anodise
SOLVANTS	
Acétone	Pas d'attaque
Alcool à brûler	Pas d'attaque
Dioxanne	Pas d'attaque
Essence F	Pas d'attaque
Ethanol concentré	Pas d'attaque
Ethanol dénaturé	Pas d'attaque
Méthyléthylcétone	Pas d'attaque
Pétrole désaromatisé	Pas d'attaque

Tétrahydrofuranne	Pas d'attaque
Toluène	Pas d'attaque
Trichloroéthylène	Pas d'attaque
White spirit	Pas d'attaque
Xylène	Pas d'attaque
ACIDES	
Acide acétique (20%) (vinaigre)	attaque
Acide chlorhydrique (30%)	attaque
Acide nitrique (30%)	attaque
Acide sulfurique (30%)	attaque
BASES	
Ammoniaque (32%) (Alcali)	attaque
Hydroxyde de potassium (5%) (potasse)	attaque
Hydroxyde de potassium (20%) (potasse)	attaque
Hydroxyde de sodium (5%) (soude)	attaque
Hydroxyde de sodium (20%) (soude)	attaque
AUTRES	
Eau de javel diluée (5%)	Pas d'attaque (sauf si aluminium brut)
Eau déminéralisée	Pas d'attaque

TABLEAU 18. LISTE DE PRODUITS NETTOYANTS ET LEUR AGRESSIVITE [29]

Produits	Effets généraux sur l'aluminium laque		
	Début de l'attaque	Perte de brillance	Détérioration du film
SOLVANTS			
Alcool à brûler	48 heures	Pas de perte	Aucune détérioration
Dioxanne	Immédiatement	Non mesurable	Film détruit
Essence F	Pas d'attaque	Pas de perte	Aucune détérioration
Ethanol dénaturé	Pas d'attaque	Pas de perte	Aucune détérioration
Pétrole désaromatisé	Pas d'attaque	Pas de perte	Aucune détérioration

ACIDES			
Acide acétique (20%) (vinaigre blanc*)	Très légère attaque après 48h	Environ 5%	Aucune détérioration
Acide chlorhydrique (30%)	Très légère attaque après 48h	Pas de perte de brillance mais Décoloration importante	Aucune détérioration
Acide nitrique (30%)	2 à 3 heures	~ 20 % Décoloration importante	Film détruit
Acide sulfurique (30%)	Film intact	Pas de perte	Aucune détérioration
BASES			
Ammoniaque (32%) (Alcali)	Film intact	Pas de perte	Aucune détérioration
AUTRES			
Eau de javel diluée (5%)	Film intact	Pas de perte	Aucune détérioration
Eau déminéralisée	Film intact	Pas de perte	Aucune détérioration

TABLEAU 19. LISTE DE PRODUITS NETTOYANTS ET LEUR AGRESSIVITE SUR L'ALUMINIUM LAQUE [30]

De manière générale, la méthode de nettoyage change en fonction de la fréquence de nettoyage. Si la structure possède beaucoup de saletés, c'est-à-dire une surface fortement encrassée, le nettoyage doit être plus agressif la première fois que les fois suivantes. Pour cela, il existe des solutions tampons synthétiques qui avec l'eau sont très acides afin de dégraisser toute la saleté et qui permettent donc ensuite de nettoyer la structure avec des produits de nettoyages quotidiens tels que du savon et ou simplement de l'eau. Pour finir le traitement, un rinçage à l'eau de la structure est primordial afin d'enlever toutes traces restantes de produit qui pourraient engendrer des problèmes sur la surface de la structure.

5.1.1. ATTAQUES MICROBIOLOGIQUES

Les attaques microbiologiques se produisent en général lorsque le matériau est poreux dû à sa structure ou aux impacts destructifs des sédiments du vent. Les attaques sont favorisées par des facteurs extérieurs qui sont l'absence de lumière et la forte humidité due à la pluie qui reste dans ces pores. Le meilleur moyen d'éviter ces attaques est d'exposer la structure à l'intérieur ou de la couvrir. Cependant, si ceci n'est pas réalisable, la meilleure solution est de nettoyer correctement et fréquemment la pièce puis la sécher pour éviter une propagation des attaques microbiologiques.

5.2. DEFAUTS MACROSTRUCTURAUX

Les défauts macrostructuraux existent déjà sur les structures et sont très difficiles à éliminer sans changer la composition morphologique, chimique ou sans faire un traitement envahissant de la pièce. Il est possible de remarquer plusieurs défauts macrostructuraux sur la tôle pliée présente sur le

SHED. Ceci peut être dû à l'effet de son poids, de l'eau de pluie ou même des chocs sur la structure dus au transport et à l'installation de celui-ci au musée de l'histoire du fer.

Les premières raisons citées n'engendrent pas de problème majeur si ce n'est la modification de l'esthétique de la structure. Cependant, avec le temps, la structure peut arriver à sa limite de fatigue et se casser si un traitement adéquat n'est pas réalisé afin de jouer le rôle de renforcement.

Le problème des chocs ou des défauts présents sur la structure est plus important. En effet, la couche d'oxydation a probablement été détruite et par conséquent, en exposant la pièce en extérieur, elle est soumise à l'effet de corrosion. Il n'est cependant pas possible d'éliminer ces défauts mais un traitement surfacique, non envahissant, comme le vernis permettra de protéger les défauts de la corrosion.

5.2.1. CONTRAINTES MECANIQUES EXTERIEURES

Quand les pièces sont exposées à l'extérieur, il y a de multiples effets météorologiques qui affectent la structure des pièces en créant des sollicitations mécaniques. Ces effets, tableau 17, peuvent être le vent, l'eau, etc...

Ils peuvent, au fil du temps, affecter la structure des pièces et les déformer.

La meilleure solution pour éviter ces effets est de stocker les pièces dans une atmosphère protégée, c'est-à-dire à l'intérieur du musée.

5.2.2. EFFET DE LA TEMPERATURE, DILATATION

[31] ; [32].

A cause du gradient de la différence de température entre chaque journée de l'année (figure 17), la pièce est soumise à un gradient de température qui entraîne une dilatation de l'aluminium. Cette dilatation n'est pas très importante car elle n'est pas visible à l'œil nu mais, pour la microstructure, cela peut avoir un impact négatif.

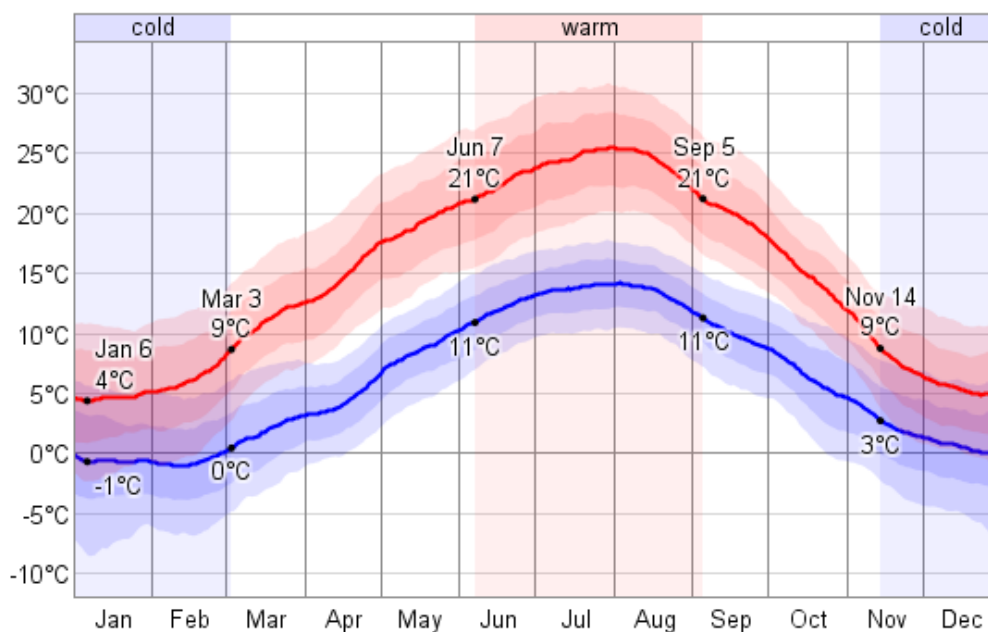


FIGURE 18. EVOLUTION DE LA TEMPERATURE SUR UNE ANNEE A NANCY [33]

Il est possible d'observer que l'écart maximal est, au fil d'une année, de environ 30°C. A noter que la figure 18 donne les températures sous abri. Exposées au soleil, les températures des pièces peuvent être bien supérieures, il s'agit donc, ci-dessous, d'une estimation de la dilatation de l'aluminium.

$$V_f = V_i \cdot (1 + \alpha_l \cdot (T_f - T_0))$$

avec

$$V_i = \text{Volume initial [m}^3\text{];}$$

$$V_f = \text{Volume final [m}^3\text{];}$$

$$\alpha_l = \text{Coefficient de dilatation thermique lineal du materiel [K}^{-1}\text{];}$$

$$T_f \text{ et } T_0 = \text{Sont la temperature final et initial respectivement.}$$

Il est possible d'écrire aussi:

$$\Delta T = T_f - T_0$$

avec

$$\Delta T \text{ l'écart maximal.}$$

En observant le graphique précédent,

$$\Delta T = 25 - (-1) = 26 \text{ }^{\circ}\text{C} = 26 \text{ K}$$

qui représente l'écart maximal entre le plus froid et le plus chaud (en moyenne).

En prenant

$$\alpha_l = 23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \text{ [34]}$$

Il est possible de calculer la variation de volume:

$$V_f = V_i \cdot (1 + \alpha_l \cdot (T_f - T_0)) = V_i \cdot (1 + \alpha_l \cdot \Delta T) = V_i \cdot (1 + 23 \cdot 10^{-6} \cdot 26)$$

$$\frac{V_f}{V_i} = 1.000598$$

Afin de protéger les pièces au maximum, l'exposition doit se faire dans la même optique que les sollicitations initiales, dont le constructeur a déjà calculé la dilatation maximale afin de laisser des espaces de sécurité pour cette augmentation de volume.

Dans ce cas, il est possible d'observer que la dilatation maximale est très petite, en effet, pour une pièce de 1 mètre, la déformation est de:

$$\frac{V_f}{V_i} = \frac{L_f \cdot S}{L_i \cdot S} = 1.000598 = \frac{L_f}{L_i}$$

$$L_f = 1.000598 \cdot L_i = 1.000598$$

Il y a donc une déformation de 0.000598 m (0.598 mm). La déformation est effectivement très petite et il est possible de considérer que la déformation n'évoluera pas, cependant quelques millimètres représentent la déformation critique.

A noter que le problème majeur est au niveau de l'assemblage de matériaux dû au fait que ceux-ci possèdent différents coefficients de dilatation thermique.

5.2.3. EFFET DU TEMPS : INFLUENCE ET CHANGEMENT DE LA MICROSTRUCTURE

Un autre type de contraintes est la contrainte exercée par le propre poids de la pièce. Avec le temps et les contraintes mécaniques extérieures, cet effet peut déformer la pièce. En effet, la structure a été déformée à cause l'épaisseur du métal qui est très faible et, avec le temps, la microstructure a changé (affaissement de la tôle).

Pour éviter cela, il existe des nervures dans la structure pour la renforcer. Cependant c'est une méthode envahissante qui est pratique à long terme.

Une autre méthode possible est l'utilisation de méthodes thermodynamiques afin de récupérer la forme du métal initiale en augmentant la température à 70% de la température de fusion. En effet, cette montée en température aura pour but de recristalliser le métal et de pouvoir le déformer jusqu'à retrouver l'état initial. La méthode est envahissante et n'est donc pas réalisable sur ces structures.

Finalement, il est intéressant de voir qu'il peut être intéressant de laisser la pièce évoluer de manière naturelle, illustrant l'effet du temps sur la structure.

5.2.4. EFFET HUMAIN

L'effet humain est un facteur inévitable dans le cas où il n'est pas possible de ne pas faire visiter les pièces. Il y a donc à prendre en compte les spectateurs, le personnel de nettoyage... Il y a donc des possibilités d'endommagement de la pièce.

5.2.4.1. SPECTATEURS

Pour éviter l'endommagement causé par les spectateurs, il serait intéressant d'utiliser une barrière afin de limiter le contact avec la pièce.

5.2.4.2. AGENTS D'ENTRETIEN

Il est important de créer un plan pour les agents d'entretiens afin que le nettoyage soit fait de manière méthodique et d'éviter les problèmes liés à une mauvaise utilisation des éléments de nettoyage.

6. LES SOLUTIONS EXISTANTES POUR LA RESTAURATION ET LA CONSERVATION DE L'ALUMINIUM

La notion de couche d'oxydation déjà abordée, mince de quelques nanomètres, protège la surface extérieure des pièces d'aluminium. Cette protection est très importante pour la matériau, cependant avec l'effet du temps, l'effet de l'acidité de la pluie entraîne des perforations dans cette couche de même que les impacts ou même l'usure. Le matériel est donc exposé.

6.1. CONVERSION ELECTROLYTIQUE (ANODISATION)

[35] ; [36] ; [37] ; [38]

L'anodisation est un processus électrochimique au cours duquel la surface extérieure de l'aluminium est modifiée en augmentant la couche d'oxydation initiale. Cette méthode est très utilisée dans l'industrie pour protéger l'aluminium.

La méthode est la suivante :

Il faut appliquer un courant électrique dans un électrolyte afin d'anodiser l'aluminium (anode) grâce à du graphite souvent le plus utilisé en tant que cathode. En appliquant ce courant avec l'aide d'un générateur, la surface de l'aluminium s'oxyde et par conséquent augmente sa couche de protection (figure 19).

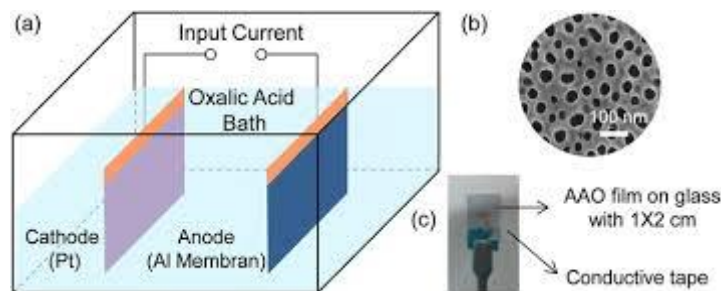


FIGURE 19. SCHEMA DE L'ELECTROLYSE [39]

Ensuite, avec le temps, les pores s'allongent comme sur la figure 20.

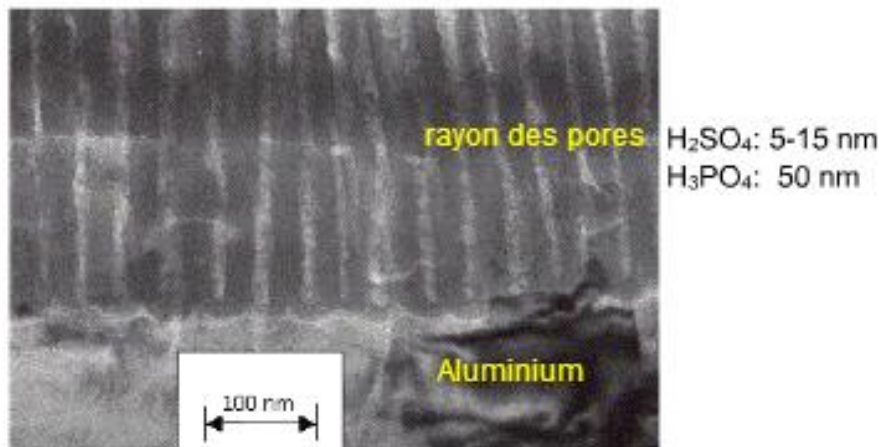


FIGURE 20. SECTION TRANSVERSALE DU FILM ANDIQUE POREUX VISUALISE AVEC TEM [39]

Les électrolytes acides, comme l'acide sulfurique, phosphorique ou chromique permettent la formation de couches d'oxyde poreuses, régulières et structurées.

Avec différents paramètres, comme le temps du processus, le courant, le voltage, la concentration, etc... Il est possible de changer l'épaisseur de la couche d'oxyde. Il est en effet possible d'obtenir quelques micromètres jusqu'à 50-100 micromètres.

Cette porosité peut être améliorée avec le colmatage. Le colmatage est un traitement hydrothermal a l'eau chaude (où sels organiques aqueux) formant une couche d'hydroxyde d'aluminium dans les porosités qui améliore les propriétés de l'aluminium.

L'anodisation est un processus qui change la structure et la morphologie externe du matériau. Il est possible de voir des exemples très clairs figure 21 et 22.



FIGURE 21. PIECE EN ALLIAGE D'ALUMINIUM AVANT SON TRAITEMENT (EN BAS) ET A LA SORTIE DU BAIN D'ACIDE APRES L'ANODISATION (EN HAUT) [40]



FIGURE 22. PIECE EN ALLIAGE D'ALUMINIUM AVANT SON TRAITEMENT (A GAUCHE) ET A LA SORTIE DU BAIN D'ACIDE APRES L'ANODISATION (A DROITE) [41]

Comme on peut voir sur les différentes images, la durée du processus change l'épaisseur de la couche d'aluminium tout en changeant aussi la surface et sa réflectivité ; Elle augmente la brillance.

Cependant anodiser les pièces de Jean Prouvé sera difficile due à la taille de celles-ci et surtout dû au fait de devoir les démonter et les remonter.

6.2. CONVERSION CHIMIQUE

La conversion chimique est la substitution de la couche d'oxyde pour une couche amorphe où cristalline d'un autre matériau de manière spontanée.

Il y a des différentes conversions chimiques mais, dans ce projet, deux conversions vont être traitées car la conversion au chrome n'est plus utilisée dû à la forte toxicité du chrome.

- Conversion au titane ou zirconium
- Phosphatation au zinc

6.2.1. CONVERSION AU TITANE OU AU ZIRCONIUM

Comme l'utilisation du chrome est interdite (fortement toxique), la conversion avec d'autres éléments est en cours de développement. L'utilisation du titane, zirconium ou même un mélange de complexes Zr-Ti est une solution. Afin de réaliser cette conversion, il faut utiliser une substance de fluor. En effet, le fluor s'utilise pour activer la surface de l'aluminium afin de convertir la couche tout en augmentant l'épaisseur.

6.2.2. REVETEMENT AU SILANE

Le silane ($\text{Si-O-C}_n\text{H}_{2n+1}$) est une molécule hybride, organique-inorganique qui après d'hydrolyse, forme la fonction silanol ($-\text{Si-OH}$). La fonction silanol peut interagir avec les substrats métalliques et former une région d'interface complexe avec un lien entre le métal et le silanol.

Afin de réaliser ce processus, il est nécessaire d'avoir des fonctions OH sur la surface du matériau. Pour cela, il convient de nettoyer et décaper de manière appropriée la surface à traiter afin de la rendre passive avec le Silane. Une fois appliqué, il est nécessaire d'appliquer un traitement thermique pour agrandir cette couche et obtenir une barrière efficace contre la corrosion.

6.3. PEINTURES DE FINITION

Il est possible de remarquer que la peinture de finition n'est pas véritablement une méthode pour améliorer la protection du matériel à la corrosion à proprement dit. En effet, il se doit d'utiliser une méthode antérieure et ensuite de recouvrir le tout par la peinture pour la finition.

Il existe différents types de peintures sur le marché qui abordées dans les parties suivantes.

6.3.1. POLYURETHANES

Les peintures basées sur les polyuréthanes ont, de manière générale, une bonne résistance aux produits chimiques et à l'humidité mais surtout une excellente résistance à l'abrasion et aux UV. Il s'agit d'un produit durable.

6.3.2. ACRYLIQUES

Les peintures avec une base acrylique ont une excellente résistance à la lumière et donc aux UV. Elles sont des bonnes peintures avec une certaine résistance aux intempéries et aux produits chimiques. Elles sont cependant très utilisées dans le secteur de l'automobile.

6.3.3. ALKYDES

Les revêtements par peinture alkydes possèdent une très bonne résistance au vieillissement, surtout liées aux intempéries. Elles sont très utilisées dans le monde de l'industrie et dans la marine.

6.3.4. VINYLES

Les solutions bases sur vinyles ne sont pas attaquées par les acides. Elles ont une bonne résistance aux solutions d'eau et de produits chimiques. De même, elles ont une très bonne résistance à l'abrasion. Les revêtements de vinyles sont résistants et souples et n'ont pas de toxicité et de couleur.

6.4. VERNIS

Une solution très intéressante est le vernis. Le vernis est une dissolution de substances dérivées des résines dans un solvant qui sèche au contact de l'air. Sa principale utilisation est pour protéger les matériaux aux agents atmosphériques externes. [42]

Il y a des nombreuses options pour protéger les matériaux, peu chères, qui sont durables et non envahissantes. De plus, le vernis est incolore dans la plupart des cas.

Il est possible de voir, par exemple, le vernis de l'entreprise Lodan (tableau 20) ou encore d'autre type de protection de même nature (annexe 2).

Type de produit	VERNIS CRISTALLIN BASE ACRYLIQUE
Information technique	Vernis de haute protection : <ul style="list-style-type: none"> • Acides • Bases • Agents chimiques • Huiles • Rayons • UV • Détergents • Atmosphères salines • Sel • Intempéries Incolore Séchage rapide à intérieur et extérieur
Spécificités sur l'aluminium	Protège contre la corrosion de l'aluminium aux endroits mis à nu par les usinages de fabrication
Domaine d'utilisation	Excellente adhérence sans primaire sur métaux nus : <ul style="list-style-type: none"> • Aluminium anodisé ou brut

TABLEAU 20. FICHE TECHNIQUE DU VERNIS [43]

6.5. RESTAURATEURS

Les restaurateurs sont des produits utilisés pour restaurer et récupérer l'allure originale des pièces. Due à l'utilisation intensive de l'aluminium dans le bâtiment, il existe de multiples options pour la restauration de celui-ci (figure 23). Néanmoins, vu que tous les restaurateurs sont plus ou moins abrasifs, il faut être prudent lors de l'utilisation d'un d'entre eux, particulièrement quand il est appliqué sur l'aluminium anodisé. L'aluminium possède une couche d'oxydation qui est naturelle et sert de protection. Il ne faut donc pas l'affecter. Quelques fiches de restaurateurs pouvant être utilisés sont présentées en annexe (annexe 3).

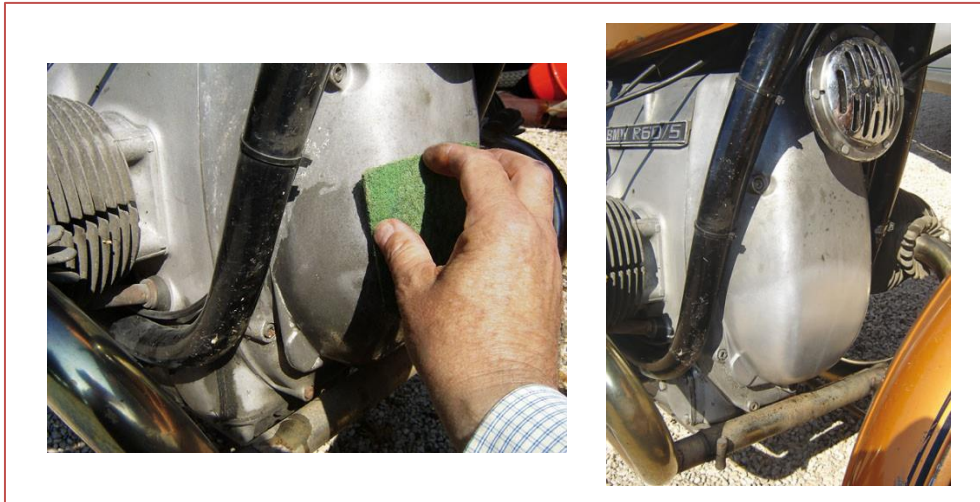


FIGURE 23. NETTOYAGE D'UN MOTEUR EN ALUMINIUM AVEC UN RESTAURATEUR [44]

III. LES PIÈCES DE JEAN PROUVE

1. LE PORTIQUE D'ORLY

Le portique a été conçu par Mr. Prouvé à la fin des années 1950 pour servir d'entrée à la terrasse du troisième étage de l'aéroport d'Orly (figure 24). Au troisième étage, il y avait un espace où il était possible de voir décoller et atterrir les avions mais dont l'accès était payant. Pour pouvoir contrôler l'accès à la terrasse, Jean Prouvé a construit de hauts chevalets, revêtus d'aluminium, auxquels étaient fixés deux séries de tourniquets d'entrée et de battants de sortie pour les visiteurs.

En 1998, le portique a été enlevé de l'aéroport d'Orly pour être rénové. En 2001, il a été exposé dans le parc de la Pépinière, à Nancy, pour célébrer le centenaire de la naissance de Mr. Prouvé. A la suite de ces manifestations, le portique a été installé à l'entrée du musée de l'Histoire du Fer. Cette pièce a appartenu à l'association « Les Amis de Jean Prouvé » jusqu'en 2003 qui en a fait don à la communauté urbaine du Grand Nancy. [4]



FIGURE 24. LE PORTIQUE A L'AEROPORT D'ORLY [50]

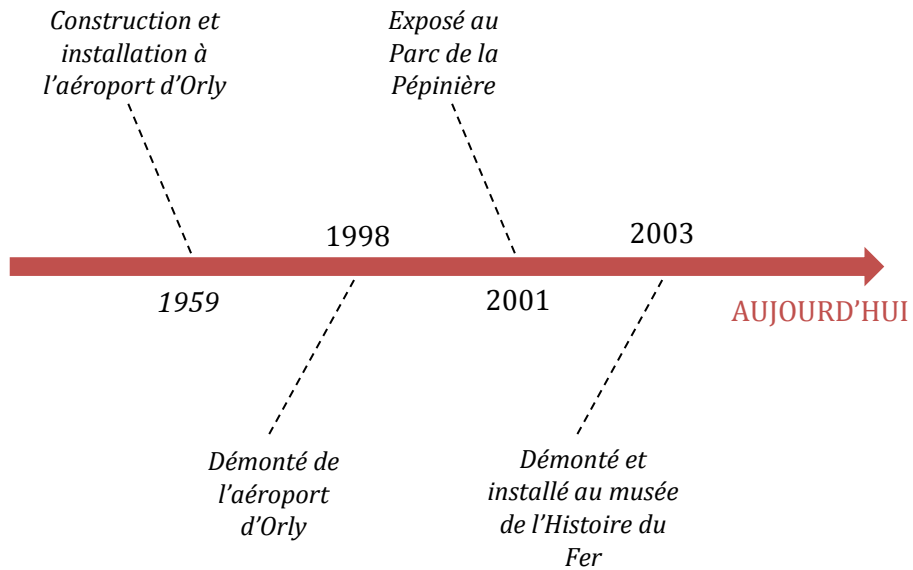
1.1. DESCRIPTION PHYSIQUE

Le portique est constitué d'une ossature en acier recouverte d'aluminium. Il mesure approximativement 4 mètres de hauteur et 8 mètres de largeur (figure 24) [5]. Les deux séries de tourniquets d'entrée et les battants de sortie pour les visiteurs ne sont plus présents sur la pièce. Il reste cependant les fixations de ceux-ci.



FIGURE 25. LE PORTIQUE D'ORLY AU MUSEE DE L'HISTOIRE DU FER

1.2. CHRONOLOGIE



L'histoire du portique d'Orly au niveau du montage/démontage est importante pour la suite du projet lors de la proposition de solution. Le plus important est de savoir s'il a subi des traitements auparavant.

1.3. ETAT ACTUEL

Dans cette partie, les problèmes présents sur le portique (figure 26) vont être listés sous forme de tableaux (tableau 22 à 32) et résumés en un tableau bilan (tableau 21).



FIGURE 26. LE PORTIQUE D'ORLY ANNOTE POUR L'ETUDE DES PROBLEMES

TABLEAU BILAN

Photo	Partie de la pièce	L'état de l'objet
1	La surface en dessous de la barre transversale du portique	Des taches noires sur toute la surface.
2	La surface du battant de sortie	Des taches noires sur une partie des battants de sortie.
3	La surface en dessous de la fixation du battant de sortie	Surface couverte de mousse, pas de trace évidente de corrosion.
4	Le bord d'un pied du portique	Égratignures sur la surface. Dégâts plus petits de même nature que sur d'autres parties du portique.
5	La surface d'un pied du portique	Surface couverte de mousse. Problème général sur toute la structure.
6	Les fixations des barreaux	Vis pas en aluminium, probablement fer, donc engendre de la corrosion galvanique.
7	Joint de fixation du battant de sortie	Changement de couleur du métal.
8	La fixation d'un tourniquet d'entrée	Changement de couleur.
9	La fixation entre le portique et le socle	Pièce soudée sur le socle et fixé au portique par l'intermédiaire de vis. Pas de changement spécial de couleur autour des points de soudage. Taches marron sur la surface de la fixation. Les vis sont légèrement corrodées.
10	Le socle du portique	Changement de couleur, taches marron sur tout le socle. Le socle est partiellement corrodé surtout sur les bords.
11	Surface sur laquelle repose le socle	Complètement corrodée.

TABLEAU 21. TABLEAU RECAPITULATIF DES PROBLEMES SUR LE PORTIQUE

Photo 1	
Partie de pièce	La surface en dessous de la barre transversale du portique
Description	Des taches noires sur toute la surface.

TABLEAU 22. ANALYSE PHOTO N°1 DU PORTIQUE

Photo 2	
Partie de pièce	La surface du battant de sortie
Description	Des taches noires sur une partie des battants de sortie

TABLEAU 23. ANALYSE PHOTO N°2 DU PORTIQUE


Photo 3	
Partie de pièce	La surface en dessous de la fixation du battant de sortie
Description	Des taches noires sur une partie de la surface.

TABLEAU 24. ANALYSE PHOTO N°3 DU PORTIQUE


Photo 4	
Partie de pièce	Le bord d'un pied du portique
Description	Égratignures sur la surface. Dégâts plus petits de même nature présente sur d'autres parties du portique.
Evaluation	Pas d'effet évident sur le métal autour des égratignures.

TABLEAU 25. ANALYSE PHOTO N°4 DU PORTIQUE

Photo 5	
Partie de pièce	La surface d'un pied du portique
Description	Surface couverte de mousse. Problème général sur toute la structure.
Evaluation	Pas de changement évidant du métal dans l'aire contaminée.

TABLEAU 26. ANALYSE PHOTO N°5 DU PORTIQUE


Photo 6	
Partie de pièce	Les fixations des barreaux
Description	Vis pas en aluminium, probablement fer, donc engendre de la corrosion
Evaluation	Corrosion évidente. Changement de vis à certains endroits, mais trace de rouille sur les barreaux toujours présente.

TABLEAU 27. ANALYSE PHOTO N°6 DU PORTIQUE


Photo 7	
Partie de pièce	Joint de fixation du battant de sortie
Description	Changement de couleur du métal.
Evaluation	Probablement provoqué par la présence de fer, l'aluminium n'a pas l'air d'être attaqué.

TABLEAU 28. ANALYSE PHOTO N°7 DU PORTIQUE


Photo 8	
Partie de pièce	La fixation d'un tourniquet d'entrée
Description	Changement de couleur
Evaluation	Probablement du fer corrodé. Pas de changement de l'aluminium autour de la fixation.

TABLEAU 29. ANALYSE PHOTO N°8 DU PORTIQUE


Photo 9	
Partie de pièce	La fixation entre le portique et le socle
Description	Pièce soudée sur le socle et fixé au portique par l'intermédiaire de vis. Pas de changement spécial de couleur autour des points de soudage. Tâches marron sur la surface de la fixation. Les vis sont légèrement corrodées.
Evaluation	Provoqué par du fer corrodé. Pas de changement de l'aluminium du portique.

TABLEAU 30. ANALYSE PHOTO N°9 DU PORTIQUE


Photo 10	
Partie de pièce	Le socle du portique.
Description	Changement de couleur, taches marron sur tout le socle. Le socle est partiellement corrodé surtout sur les bords.
Evaluation	Les taches marron sont de la rouille. Le socle est probablement constitué d'acier.

TABLEAU 31. ANALYSE PHOTO N°10 DU PORTIQUE

Photo 11	
Partie de pièce	Surface sur laquelle repose le socle
Description	Complètement corrodé.
Evaluation	Socle en fer ou acier. Il est en contact avec le socle ce qui engendre une augmentation de la corrosion sur ce dernier.

TABLEAU 32. ANALYSE PHOTO N°11 DU PORTIQUE

1.4. ETUDE DES PROBLEMES MAJEURS

Afin de préconiser des solutions de manière optimale, il a été préférable de développer la méthode de Pareto (annexe 1) afin de se pencher sur les problèmes majeurs et graves dans les pièces. Pour cela, les pièces ont été analysées pour caractériser les différents problèmes. Ensuite, les problèmes identifiés ont été regroupés par groupe qui nous permettra d'utiliser la méthode de Pareto.

Il y a 4 groupes :

- N pour noircissures ;
- CG pour corrosion galvanique ;
- I pour impacts ;
- S pour saleté ;
- OF pour oxydation fer ;
- SO pour soudage.

Photo	Identifications	Problèmes	Solutions
Photo 1	N	Noircissures	Rénovateur
Photo 2	I	Impact	---
Photo 3	I	Impact	---

Photo 4	I	Impact	---
Photo 5	S	Saleté	Nettoyage
Photo 6	CG	Corrosion galvanique fer - aluminium	Rénovateur
Photo 7	OF	Oxydation fer	Rénovateur
Photo 8	OF	Oxydation fer	Rénovateur
Photo 9	CG	Corrosion galvanique fer - aluminium à la soudure	Rénovateur
Photo 10	OF	Oxydation fer	Rénovateur
Photo 11	OF	Oxydation fer	Rénovateur

TABLEAU 33. IDENTIFICATION DES PROBLEMES DU PORTIQUE ET LES SOLUTIONS

Nombre de fois présent sur la structure	Identifications	% cumulés	ABC
4	OF	36,36 %	A
3	I	63,63 %	A
2	CG	81,81 %	B
1	N	90,90 %	C
1	S	100,0 %	C

TABLEAU 34. RECAPITULATIF DES IDENTIFICATIONS

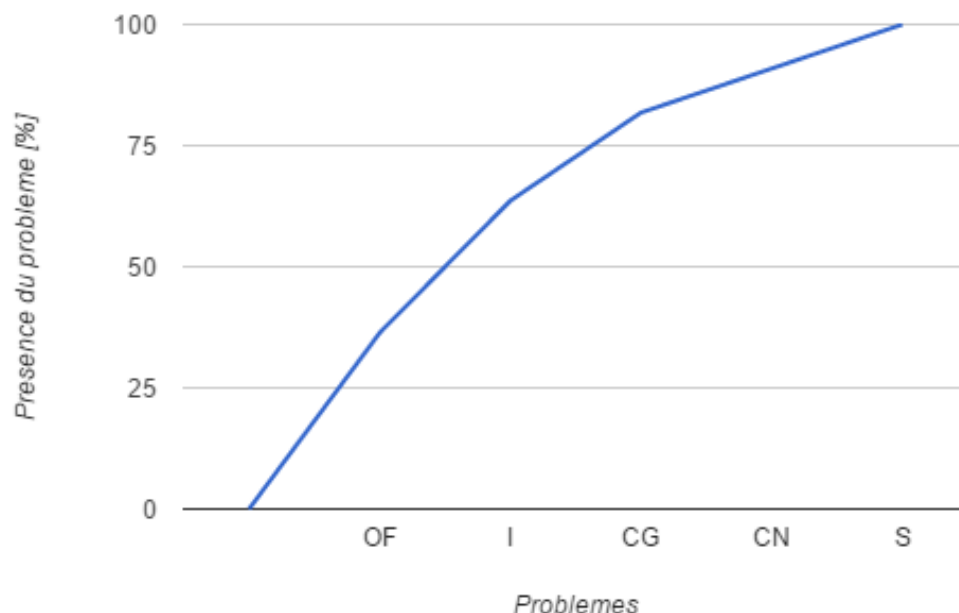


FIGURE 27. DIAGRAMME DE PARETO DU PORTIQUE D'ORLY

Les problèmes du portique les plus présents sont l'oxydation du fer qui est en contact avec l'aluminium, des impacts, les problèmes de déformation macrostructurale et la corrosion galvanique.

2. DEUXIEME PIECE : LA POUTRE DU PAVILLON DE L'ALUMINIUM

Le Pavillon du centenaire de l'aluminium monté sur les quais de la Seine à Paris abritait différents procédés de fabrication et de traitement des matériaux dans un contexte industriel français en plein essor. Pour ce faire, Jean Prouvé a conçu une galerie qui s'étend sur une surface de 150m de longueur. Cette construction qui allie légèreté, maniabilité et facilité de montage et démontage synthétise les longues recherches de l'architecte dans ce cadre. Le pavillon subit alors une série d'installation-démontage par la suite dans divers sites. Transporté à Lille en 1956 à l'occasion de la foire internationale, il est stocké par la suite en pièces détachées et sombre dans l'oubli avant d'être placé à nouveau au parc des expositions de Villepinte en 1999 pour servir de hall d'exposition alors qu'il été destiné à la destruction. [45]

2.1. DESCRIPTION PHYSIQUE

Initialement conçu pour servir d'exposition de produits et de procédés de fabrication à l'occasion du centenaire de l'aluminium en France, le pavillon représentait en lui-même une illustration de procédés ingénieux de fabrication. Sa construction a nécessité plus de 60 tonnes d'aluminium et d'alliages. Ancré au quai de la Seine et basé sur des poteaux à l'autre extrémité, Jean Prouvé n'as pas eu recours aux colonnes pour concevoir un bâtiment d'une excellente stabilité.

Le pavillon, qui a été installé en une durée de 21 jours, avait une longueur de 150m, une largeur de 50m et une hauteur variant de 4,60m à 7,60m. La toiture a été construite grâce à des tôles d'aluminium pliées de 4 mm qui étaient au nombre de 114. L'assemblage entre ces différentes pièces a été réalisé par des parties d'aluminium coulé réunissant des tôles d'aluminium fines comme couverture de toit. Celui-ci reposait sur des montants extrudés. Des plaques fines en aluminium ou en verre sont montées entre les montants qui étaient à leur tour assemblés au toit par des pièces en aluminium coulé. [45]

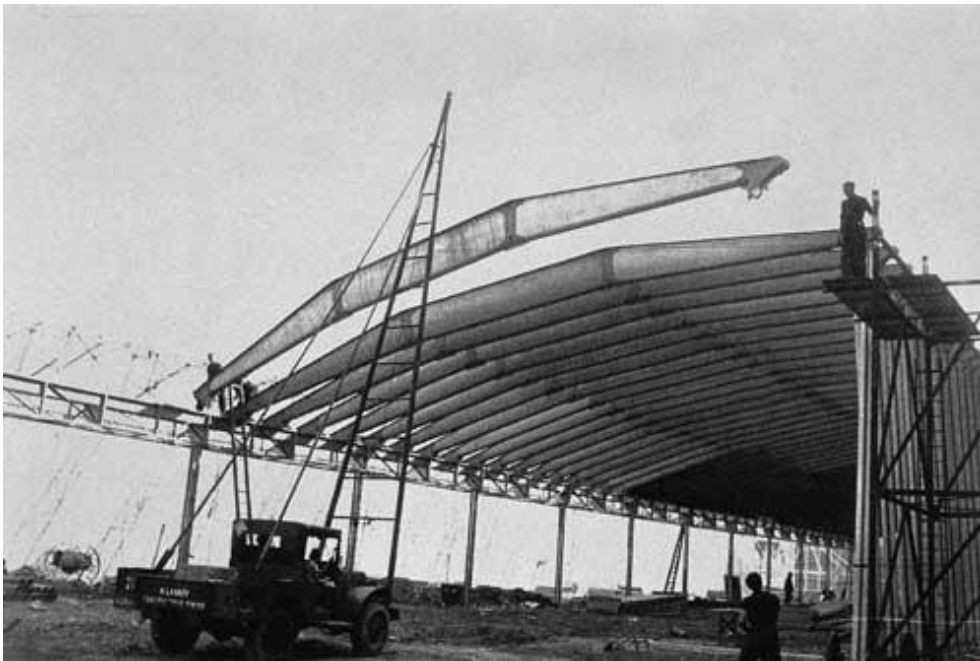
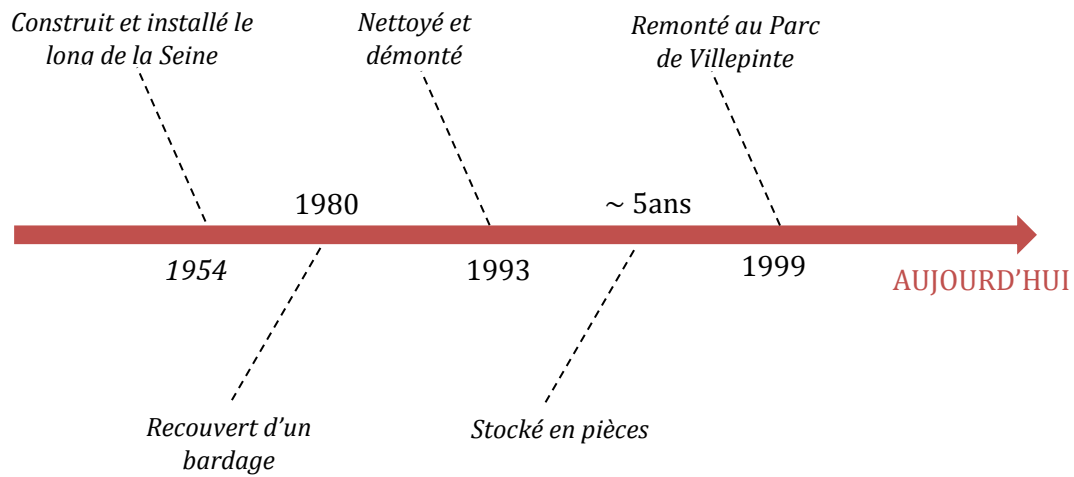


FIGURE 28. INSTALLATION DU PAVILLON DE L'ALUMINIUM LE LONG DE LA SEINE A PARIS [45]

La poutre du pavillon, pour laquelle une attention toute particulière est portée, est actuellement la propriété du musée des Beaux-Arts de Nancy sans qu'elle y soit exposée.

2.2. CHRONOLOGIE



2.3. ETAT ACTUEL

Actuellement, une poutre du pavillon est entreposée dans un hangar près de Nancy en attendant de trouver les meilleures conditions d'exposition (figure 29). La même approche que le portique d'Orly est utilisée (tableau 35 à 41).

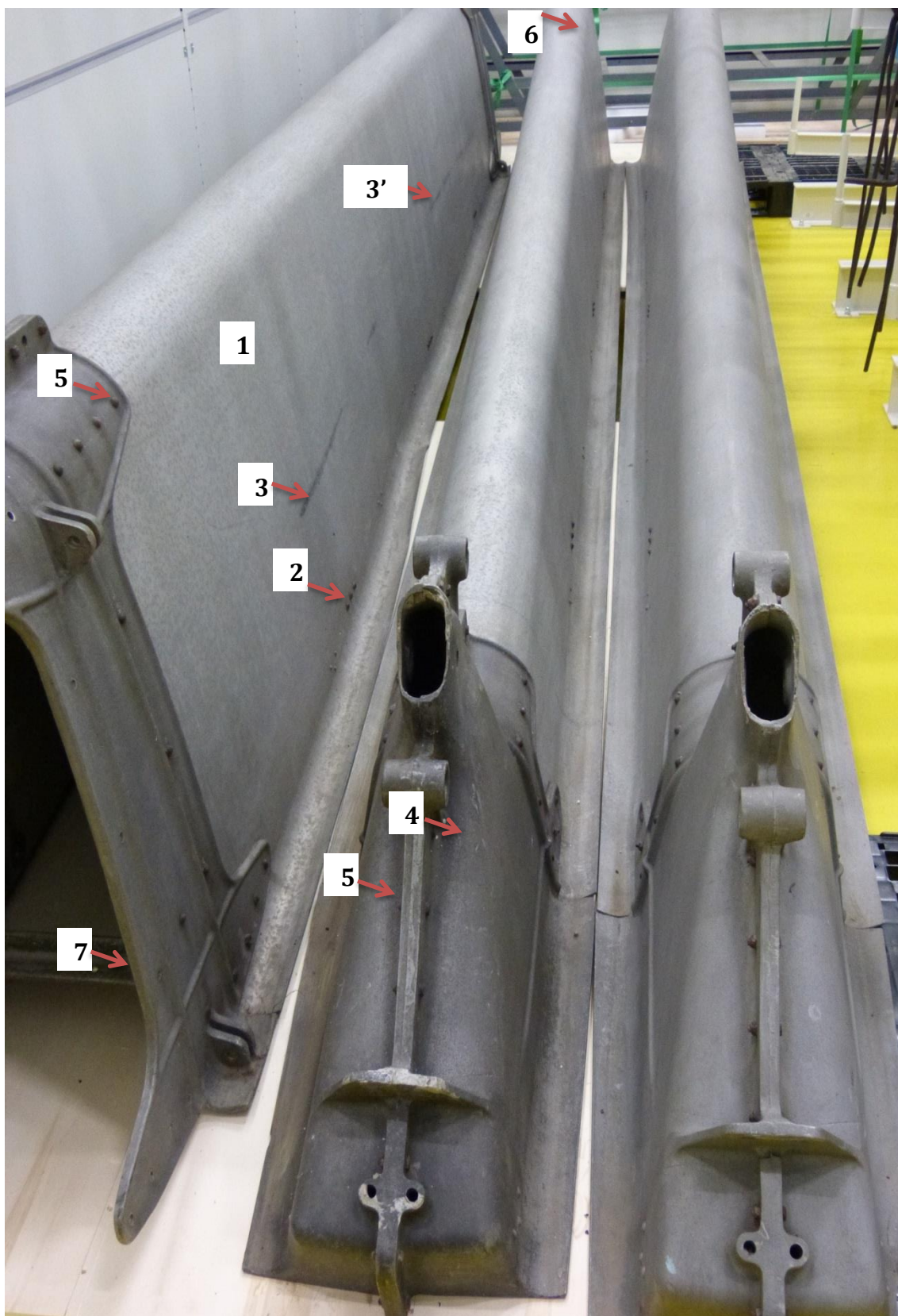


FIGURE 29. LA POUTRE DU PAVILLON DE L'ALUMINIUM ANNOTE POUR L'EDUE DES PROBLEMES

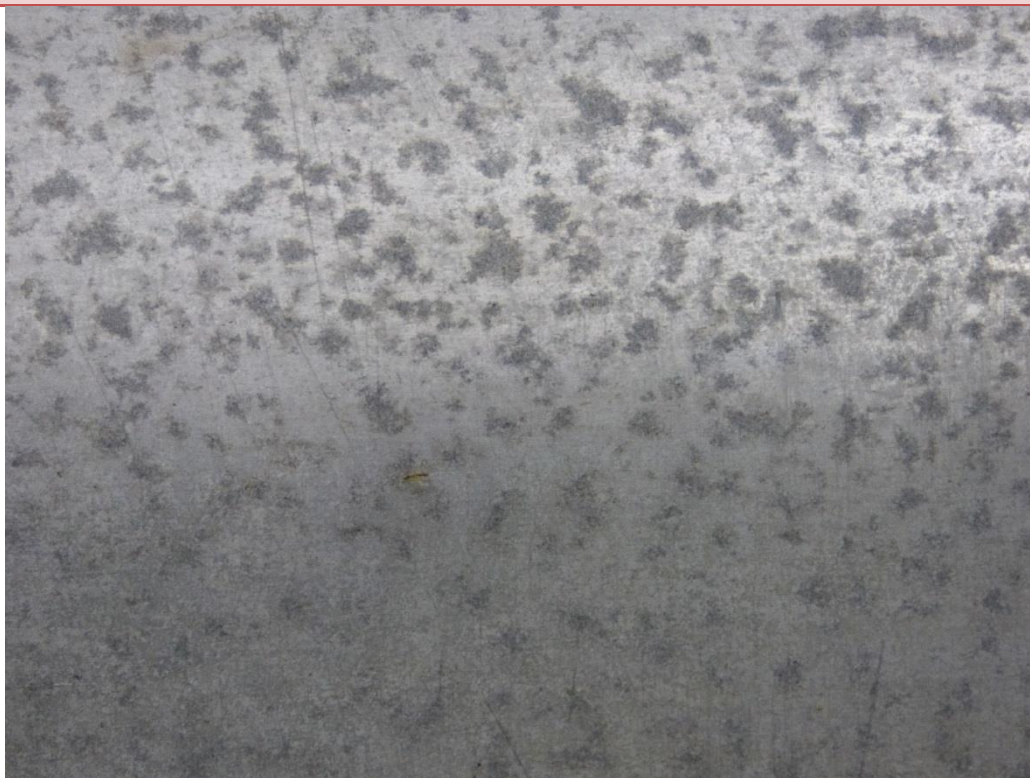
TABLEAU BILAN

Photo	Description
1	piqûres grises noires sur toute la surface de la tôle extérieure
2	Corrosion des rivets au niveau des tôles
3 - 3'	Tâches noires au niveau de la tôle extérieure
4	Dommages au niveau de la partie moulée
5	Corrosion des rivets au niveau du moulage
6	Tâches grises claires
7	Couche rugueuse partie moulée

TABLEAU 35. TABLEAU RECAPITULATIF DES PROBLEMES DU PAVILLON

Photo 1

Surface de la tôle extérieure



Apparition de petites taches de quelques millimètres grises foncées au niveau de la tôle en aluminium extérieure, distribuées uniformément.

TABLEAU 36. ANALYSE PHOTO N°1 DU PAVILLON

Photo 2

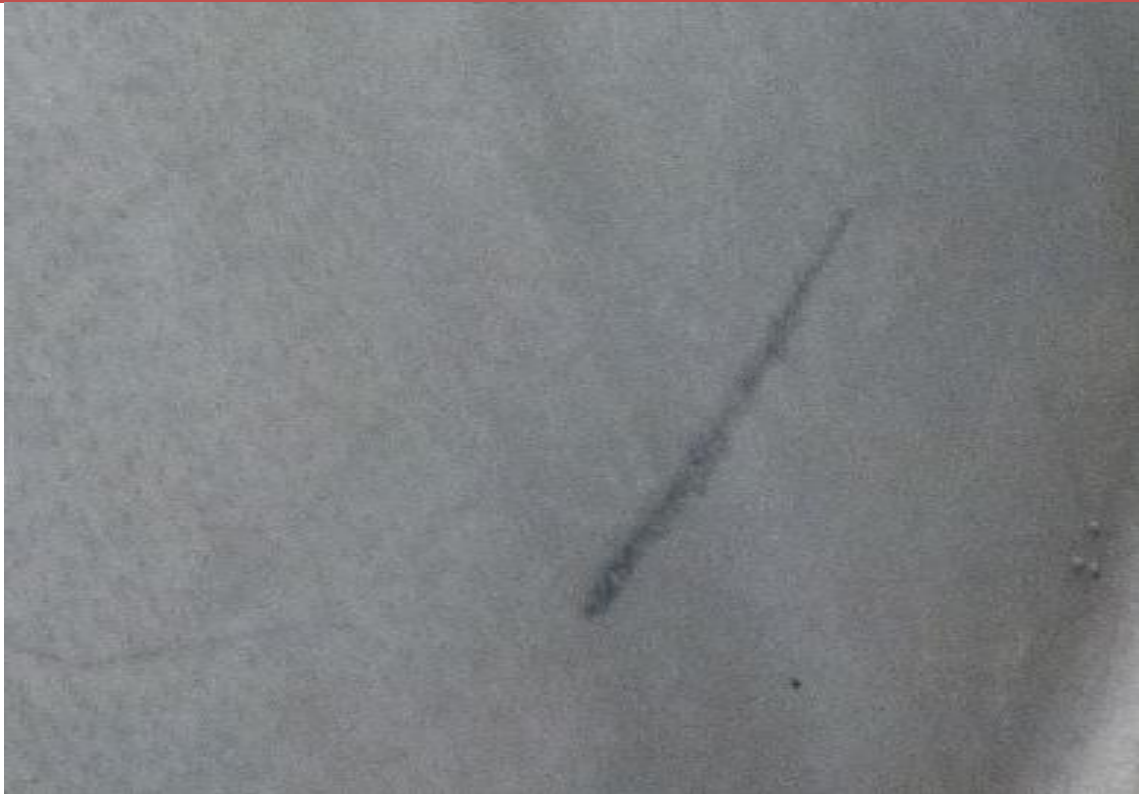
Assemblage des tôles au niveau de la surface de la poutre.



Corrosion des rivets en acier et par conséquent de la tôle en aluminium au niveau de ces assemblages.

TABLEAU 37. ANALYSE PHOTO N°2 DU PAVILLON

Photo 3
Tôle Surface



Longue tâche noire de quelques dizaines de centimètres au niveau de la surface extérieure de la tôle issue probablement du contact de la poutre avec un autre matériau.

TABLEAU 38. ANALYSE PHOTO N°3 DU PAVILLON

Photos 4 et 5
Aluminium moulé



Détérioration de l'aluminium moulé donnant lieu à une surface rugueuse, en plus de la corrosion au niveau des pièces d'assemblages en acier.

TABLEAU 39. ANALYSE PHOTO N°4 ET 5 DU PAVILLON

Photo 6

Partie extrême qui était assemblée avec une autre partie de poutre



Cette partie est épargnée des petites tâches grises noires qui ont touché toute la surface de la poutre, par contre de la matière s'est collée formant une nouvelle couche sur l'aluminium en tôles.

TABLEAU 40. ANALYSE PHOTO N°6 DU PAVILLON

Photo 7

Partie intérieure de l'aluminium moulé



Au niveau de cette partie de la poutre, exposée au soleil et à la pluie, l'aluminium est abîmé laissant place à la formation d'une surface rugueuse.

TABLEAU 41. ANALYSE PHOTO N°7 DU PAVILLON

2.4. ETUDE DES PROBLEMES MAJEURS

Photo	Identifications	Problèmes	Solutions
Photo 1	N	Noircissures	Rénovateur
Photo 2	CG	Corrosion galvanique fer - aluminium	Rénovateur
Photo 3	CG ou I	Corrosion galvanique fer - aluminium ou impactes	Rénovateur
Photos 4 et 5	CG	Corrosion galvanique fer - aluminium	Rénovateur
Photo 6	SO	Soudage	Polir
Photo 7	S	Saleté	Nettoyage + Polir + Rénovateur

TABLEAU 42. IDENTIFICATION DES PROBLEMES DU PAVILLON ET LES SOLUTIONS

Nombre de fois présent sur la structure	Identification	% cumulés	ABC
3	CG	42,86 %	A
1	N	57,15 %	B
1	I	71,42 %	B
1	S	85,71 %	B
1	SO	100,0 %	B

TABLEAU 43. RESUME DES IDENTIFICATIONS

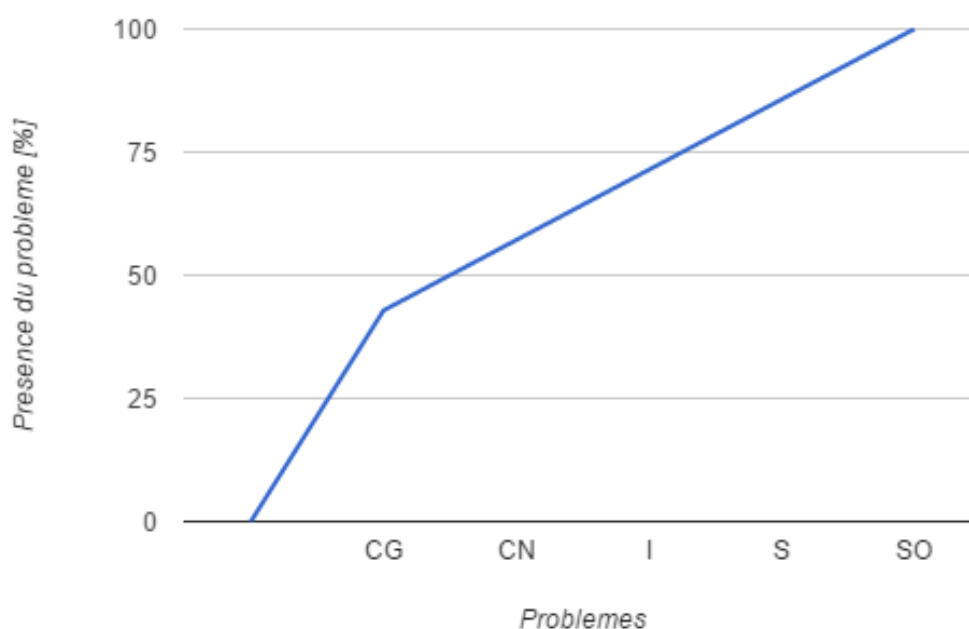


FIGURE 30. DIAGRAMME DE PARETO DU PAVILLON DE L'ALUMINIUM

Le problème le plus présent sur la poutre (figure 29) est la corrosion galvanique alors que les autres problèmes ne s'étendent pas davantage.

2.5. INSTALLATION DE LA POUTRE

2.5.1. ANALYSE D'ÉLEMENTS FINIS AVEC LES LOGICIELS CATIAV4 ET ABAQUS

Pour étudier le cas de l'installation de la poutre, les pires conditions d'installation ont été modélisées afin d'évaluer les moins bons résultats possibles et d'avoir des résultats quantitatifs sur l'installation de la poutre.

2.5.1.1. CONSTRUCTION 3D AVEC CATIA

Afin de réaliser une l'analyse souhaitée, le profil simplifier de la poutre a été modélisé dans le but de faire une analyse d'éléments finis. Pour cela, le logiciel CATIAv4 de Dassault Système version étudiant a été utilisé. Il est possible de voir l'allure générale de la poutre en 3D à la figure 30.

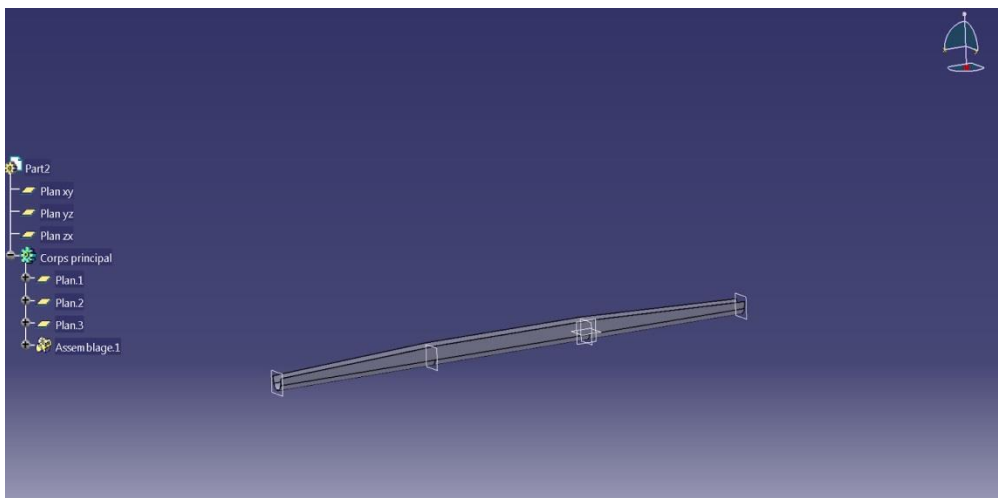


FIGURE 31. MODELISATION DE LA POUTRE AVEC CATIAV4

Il est possible de justifier l'élimination des parties moulées en aluminium joignant les 3 morceaux de poutres car, lors d'une analyse de fatigue, remplacer un élément par un élément moins résistant apporte une marge de sécurité sur les résultats obtenus. C'est la raison pour laquelle, les parties moulées ont été remplacées par des vis.

2.5.1.2. ANALYSE D'ÉLEMENTS FINIS AVEC ABAQUS

Une fois la poutre modélisée, il faut l'exporter et l'importer dans un autre logiciel de calculs par éléments finis ABAQUS, logiciel de l'entreprise Dassault System. La méthode d'éléments finis est une méthode simple à comprendre. Le but est de résoudre des équations différentielles d'un problème, avec des conditions mécaniques statiques pour le cas traité, avec une méthode d'approximation mathématique. Pour cela, il faut discrétiser le milieu étudié en éléments finis et le logiciel résout les équations pour chaque élément, en prenant en compte les éléments touchant celui étudiés.

2.5.2.1.1. LES CONDITIONS INITIALES D'ANALYSE

Les conditions initiales d'analyse sont très importantes pour la résolution du problème. Pour cela, les conditions retenues sont les suivantes:

Installation: Installation horizontale de la poutre.

Matériau: Aluminium ; Module de Young $E = 69 \text{ GPa}$; Coefficient de Poisson $\nu = 0.33$

Condition de restriction: Encastrement sur l'extrémité droite de la poutre :

$$UX = UY = UZ = RX = RY = RZ = 0$$

Encastrement sur l'extrémité gauche de la poutre.

$$UX = UY = UZ = RX = RY = RZ = 0$$

Condition de charge: Pression hydrostatique de l'eau $P = 0.002 \text{ GPa}$

2.5.2.1.2. RESULTATS

Avec ces conditions et la mise en œuvre du logiciel (Mesh, Statique Mechanic Resolution...), les résultats obtenus sont les suivants:

▪ STRESS (VON MISES)

Il est possible de voir sur la figure 32 la distribution de la contrainte dans la poutre. Les zones les plus problématiques sont les zones extrêmes là où la poutre est encastree. Cependant, le problème n'est pas grave car la tension maximale est de 12 Pa , ce qui est très négligeable.

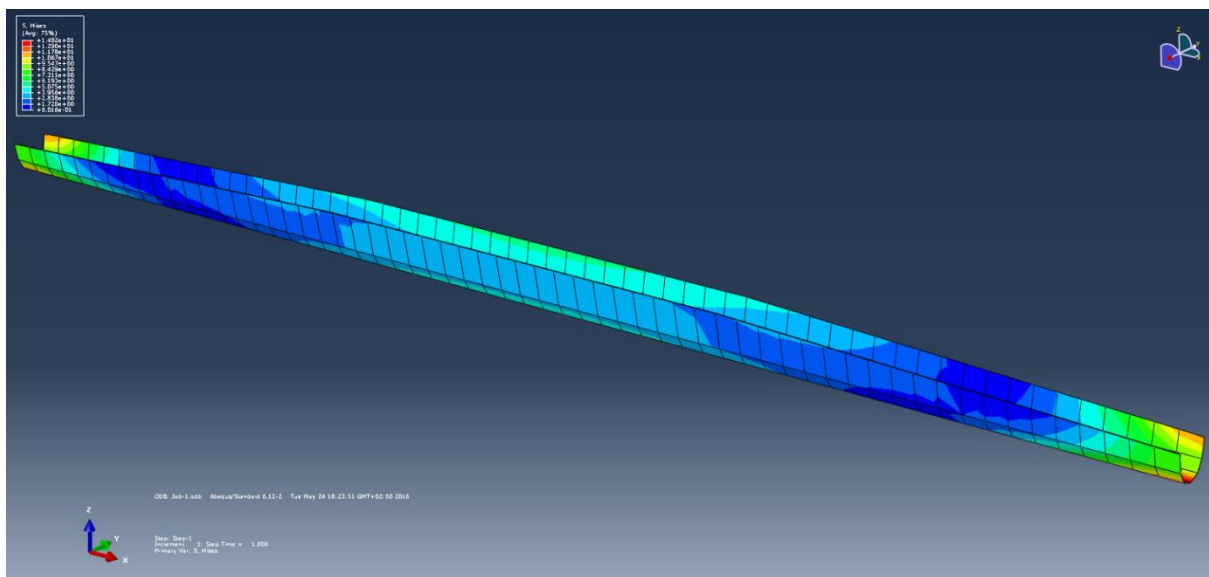


FIGURE 32. MODELISATION DES CONTRAINTES AVEC ABAQUS

Il faut savoir que l'état de contrainte n'est pas valable si on considère le cas où l'eau bouge à l'intérieur de la poutre. En effet, dans ce cas précis, l'écoulement de l'eau aux extrémités n'a pas été considéré. Il s'agit en effet d'une étude préliminaire, approximative, de ce qui se produit dans le pire des cas possible soit la poutre exposée horizontalement.

■ DEFORMATION

Sur la figure 33, il est possible de voir l'image de la déformation de la poutre de façon amplifiée afin de voir, de manière claire et concise, l'endroit où la poutre se déforme au maximum. En réalité, la déformation maximale se situe à la moitié de la poutre et la valeur est de 1.4m.

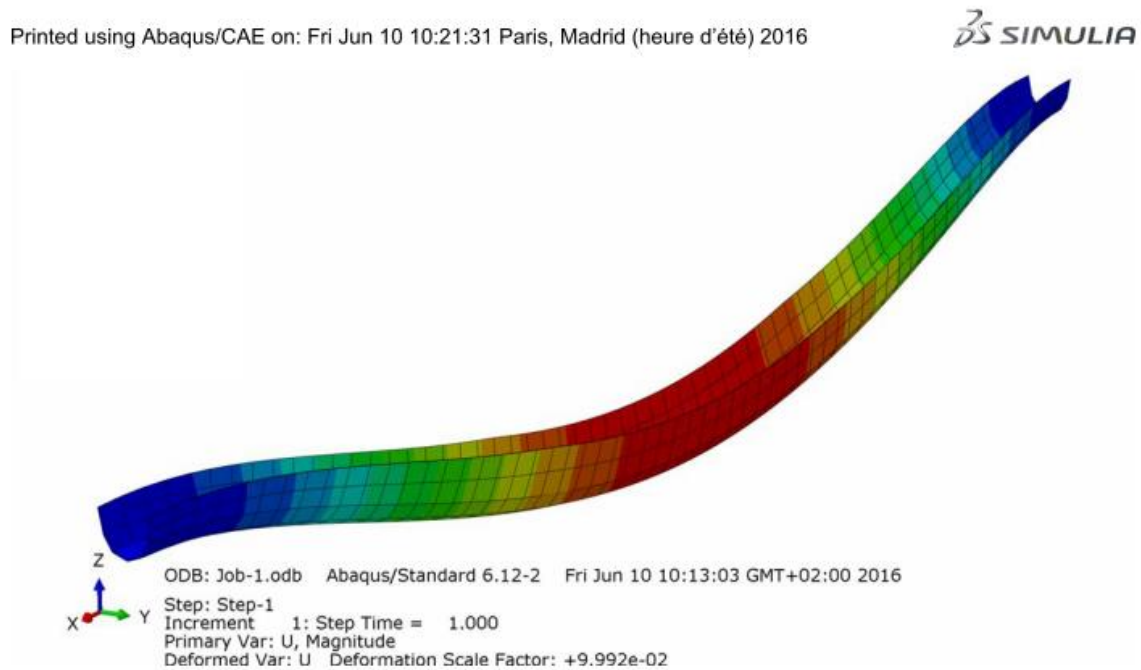


FIGURE 33. MODELISATION DE LA DEFORMATION AVEC ABAQUS

2.5.2. CONCLUSION

Cette étude, menée avec les conditions de chargement extrêmes, conduit à une déformation non négligeable. Installée dans ces circonstances, la poutre peut subir des déformations résiduelles et permanentes alors qu'elle est destinée à être conservée dans son état actuel. Dans ce cas, une configuration avec les deux encastrements aux extrémités en plus d'un appui simple au milieu de la poutre peut être envisagée afin de résister davantage au chargement et réduire les déformations. Cependant, l'appui simple au centre de la poutre ne fait pas partie de l'exposition réelle dans le passé, par conséquent il faudrait l'exposer de manière penchée (auparavant pente de 20cm/m) afin que l'eau s'écoule et que le poids de l'eau soit très faible avec un appui ou non au centre.

3. TROISIEME PIECE; LE SHED MAME

3.1. L'IMPRIMERIE MAME

[46] ; [47].

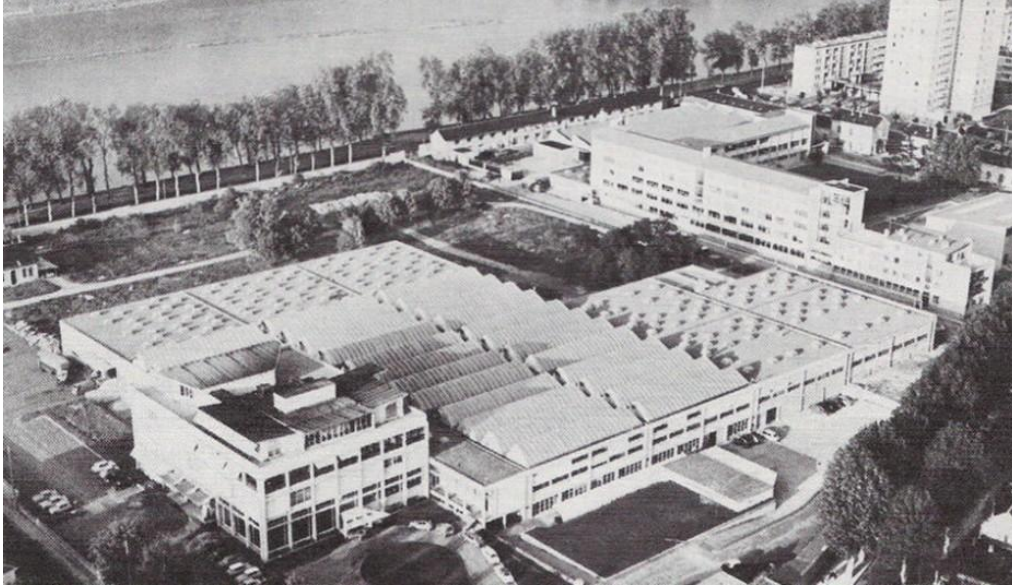


FIGURE 34. IMPRIMERIE MAME A TOURS

Réduite en ruine durant la seconde guerre mondiale, l'imprimerie Mame à Tours devint en la possession d'Alfred Mame qui n'a absolument aucun choix que de reconstruire l'usine pour ainsi être, dans la lignée de la famille Mame, la troisième génération à diriger l'imprimerie. Il pense à déléguer ce projet ambitieux au grand vainqueur du Grand Prix de Rome en 1939, l'architecte Bernard Zehruss qui réalise un bâtiment administratif et un autre consacré aux ateliers. Il confie, en outre la lourde tâche d'éclairer la vaste usine qui s'étale sur une surface de 5432 mètres carré à l'architecte Jean Prouvé qui possédait déjà une excellente réputation. Ce dernier opte pour un concept révolutionnaire, à savoir les sheds.

DEFINITION ET HISTOIRE DES SHEDS

Un shed est un élément de toiture en forme de dents de scie (figure 34 et 35) constitué de deux volets distincts et d'inclinaisons différentes. Le premier est vitré et dirigé vers le nord et le deuxième opaque.

Les sheds ont vu le jour au XIXe pendant la révolution industrielle en occident. Initialement ces constructions de toiture n'étaient présentes qu'au sein de l'industrie cotonnière avant d'englober tous les autres secteurs industriels.

INTERET DES SHEDS

Généralement orientés vers le nord, les sheds assurent ainsi un éclairage constant tout en évitant la surchauffe et l'éblouissement des ouvriers. Ils ont été largement utilisés en industrie dans un contexte économique particulier selon lequel l'éclairage par la lumière électrique est encore rare et onéreux. Une installation d'un toit en sheds constituait donc une solution efficace pour diminuer considérablement l'éclairage artificiel qui se présente parfois dangereux car assuré essentiellement par les lampes à huile ou à gaz.

MATERIAUX DE CONSTRUCTION ET DEVELOPPEMENT DES SHEDS

Vers la fin du XIXe siècle le développement des techniques de production de verre ainsi que son application à grande échelle ont été suffisants pour attirer l'attention des architectes animés par une quête permanente de nouveaux matériaux économiques substituant les colonnes de fonte qui repose essentiellement sur le métal demeurant un matériau relativement coûteux. Les matériaux constituant les sheds furent essentiellement le verre et la tuile.

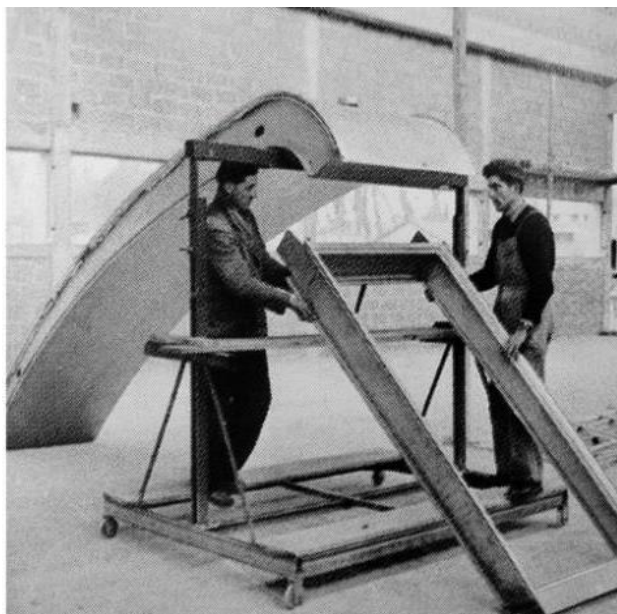


FIGURE 35. SHED EN CONSTRUCTION DANS LES ANNEES 50 A TOURS

Pour réaliser la toiture de l'imprimerie Mame, Jean Prouvé crée 672 sheds qui viendront se poser sur une structure de poteaux et de poutres en béton armé. Chacun est composé à la fois d'une ossature courbée en acier recouverte de tôles d'aluminium et d'une partie droite jouant le rôle de panneaux relecteurs de lumière à travers un éclairage indirect pouvant exploiter 80% de la lumière du jour. Ce principe inédit est couronné par le Grand Prix de l'Architecture Industrielle à Milan en 1954



FIGURE 36. TOITURE DE L'IMPRIMERIE MAME COMPOSEE DE SHEDS

3.2. DESCRIPTION PHYSIQUE

Le Shed, amené à être conservé dans le cadre de ce projet (figure 36), n'est pas un composant de la toiture de l'imprimerie Mame à Tours mais plutôt un fac-similé. Il a été reproduit exactement la même pièce avec une tôle en aluminium ainsi qu'une charpente en acier. Celui-ci est actuellement exposé en plein air au Musée de l'Histoire du Fer à Nancy.



FIGURE 37. SHED AU MUSEE DE L'HISTOIRE DU FER

3.3. ETAT ACTUEL

Pour la dernière structure, la méthode utilisée auparavant reste la méthode adéquate (tableau 44 à 55)

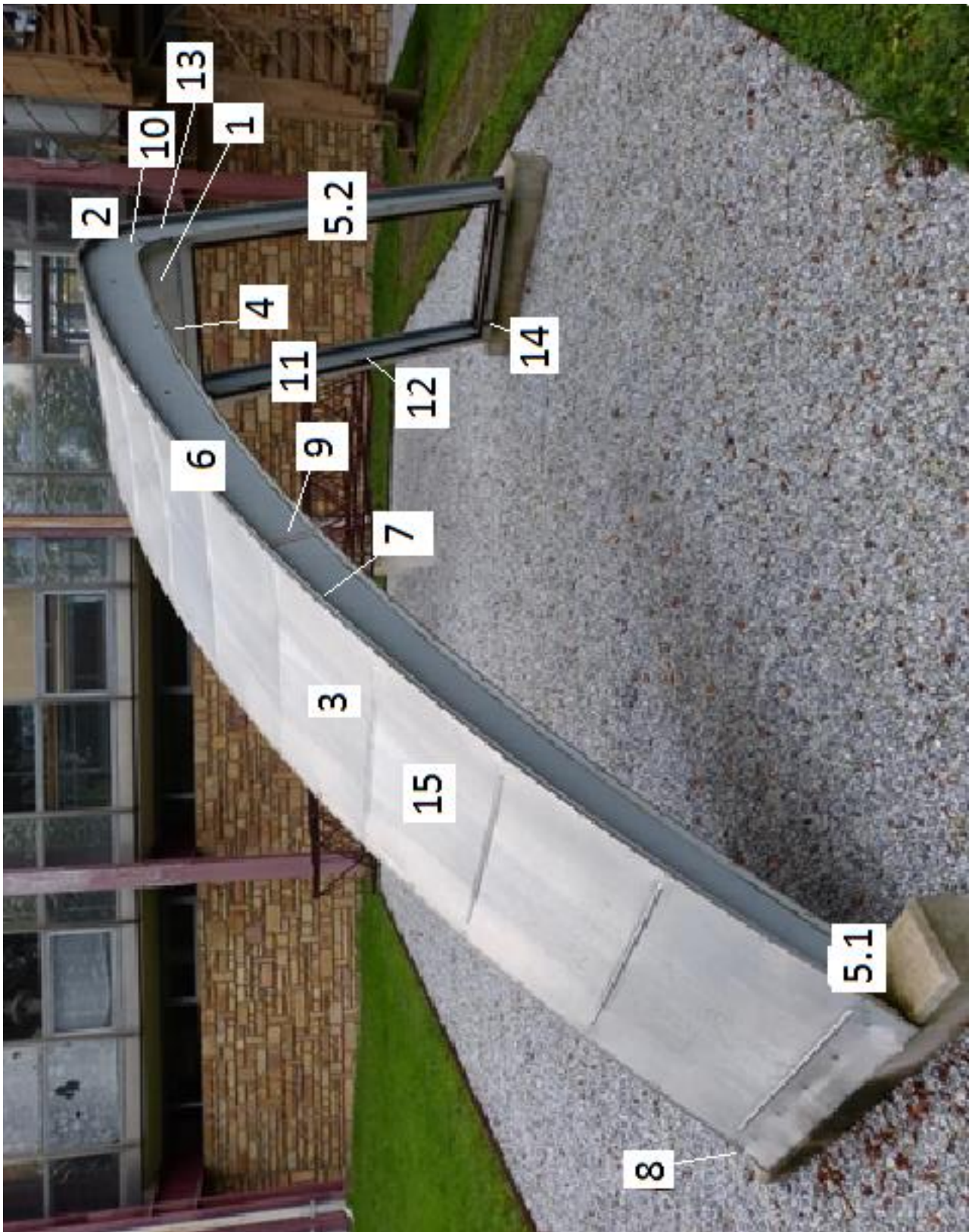


FIGURE 38. SHED ANNOTE POUR L'ETUDE DES PROBLEMES

TABLEAU BILAN

Photo	Partie de la pièce	Etat de l'objet
1	Surface inférieure de la tôle	Piques noires uniformément distribués sur la surface. Taille des piques d'environ quelques millimètres
2	Surface supérieure de la tôle	Nervures sur une partie de la surface. Taille des nervures de quelques millimètres
3	Surface supérieure de la tôle	Petites marques noires sur le surface, taille moins d'un millimètre
4	Surface inférieure de la tôle	Égratignures sur la surface. Dégâts de nature présents sur des autres parties de portique
5.1 5.2	Parties de jointures et socle	Dépôt de saleté
6	Joint entre tôle et charpente	Traces marron sur les bords de la charpente
7	Bords de charpente	Traces marron sur les bords de la charpente
8	Partie en contact avec le socle en béton	Pas de changement notable de la tôle, traces marronnes sur les bords de charpente
9	Côté de la charpente	Le texte dans la couche de peinture endommagé ainsi que la couche de peinture
10	Plaque soudée sur le bord de la charpente	Trace de rouille autour du point de soudage
11	Charpente, partie constitutive de la fenêtre	Surface complètement recouverte de rouille
12	Vis sur la tôle	La rondelle est entièrement corrodée, la tôle est un peu marron autour le vis
13	Vis sur la charpente	La rondelle est partiellement corrodée ainsi que les bords de la plaque
14	Crochet restant de la fenêtre	Partiellement corrodé, décoloration autour et sur le crochet
15	La tôle	Changement de couleur de la tôle

TABLEAU 44. TABLEAU RECAPITULATIF DE L'ANALYSE DES PHOTOS DU SHED

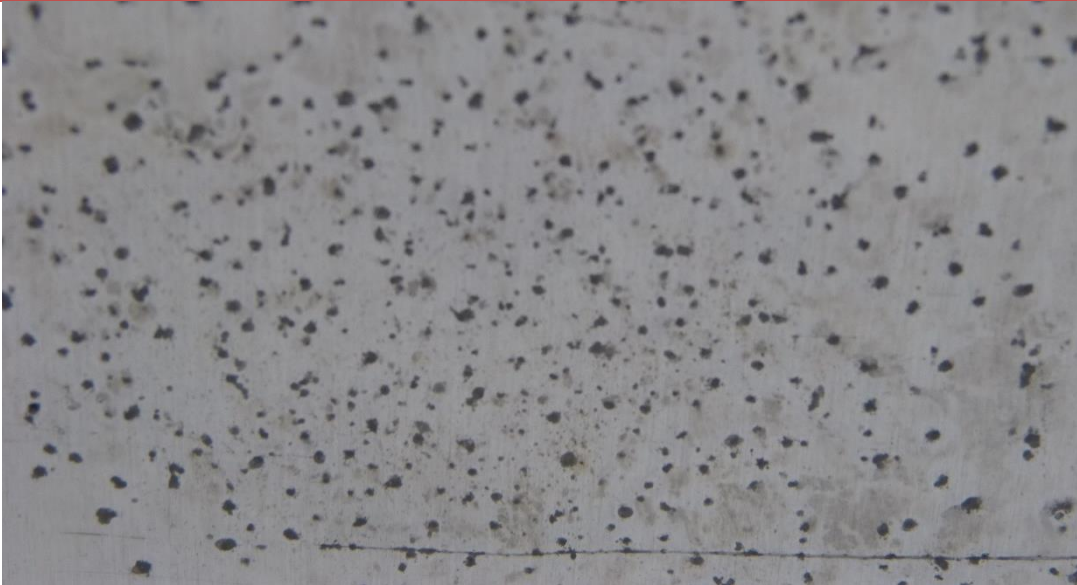
Photo 1	
Partie de pièce	Surface inférieure de la tôle
Description	Piques noires uniformément distribués sur la surface. Taille des piques d'environ quelques millimètres

TABLEAU 45. ANALYSE PHOTO N°1 DU SHED


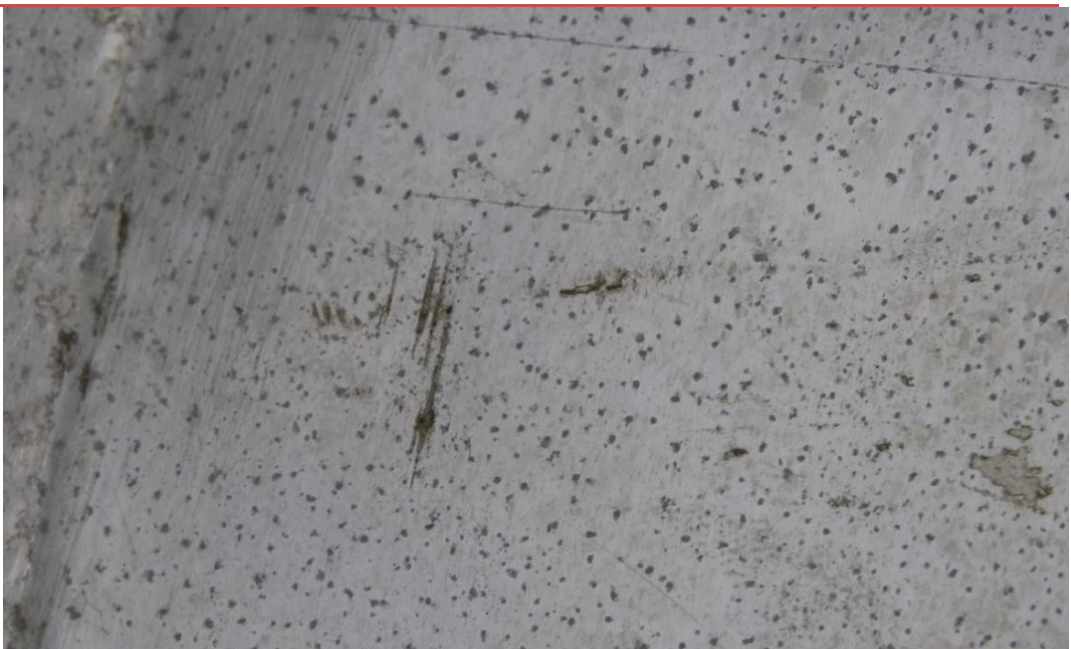
Photo 2	
Partie de pièce	Surface supérieure de la tôle
Description	Nervures sur une partie de la surface. Taille des nervures de quelques millimètres

TABLEAU 46. ANALYSE PHOTO N°2 DU SHED

Photo 3	
Partie de pièce	Surface supérieure de la tôle
Description	Petites marques noires sur la surface, taille moins d'un millimètre

TABEAU 47. ANALYSE PHOTO N°3 DU SHED

Photo 4	
Partie de pièce	Surface inférieure de la tôle
Description	Égratignures sur la surface. Dégâts de nature présents sur des autres parties de portique
Evaluation	Pas de corrosion importante autour de ces défauts

TABEAU 48. ANALYSE PHOTO N°4 DU SHED

Photo 5.1



Photo 5.2



Partie de pièce	Parties de jointures et socle
Description	Dépôt de saleté
Evaluation	Pas de corrosion en dehors des aires de dépôt de saleté.

TABLEAU 49. ANALYSE PHOTO N°5.1 ET 5.2 DU SHED



Photo 6	
Partie de pièce	Joint entre tôle et charpente
Description	Traces marron sur les bords de la charpente
Evaluation	La charpente a commencé à se corroder sur les bords en contact avec la tôle, pas d'effet spécifique observé sur la tôle. NB: Une corrosion élevée sur tous les bords de charpente est observée, mais pas de propagation spécifique sur la tôle en contact avec la charpente.

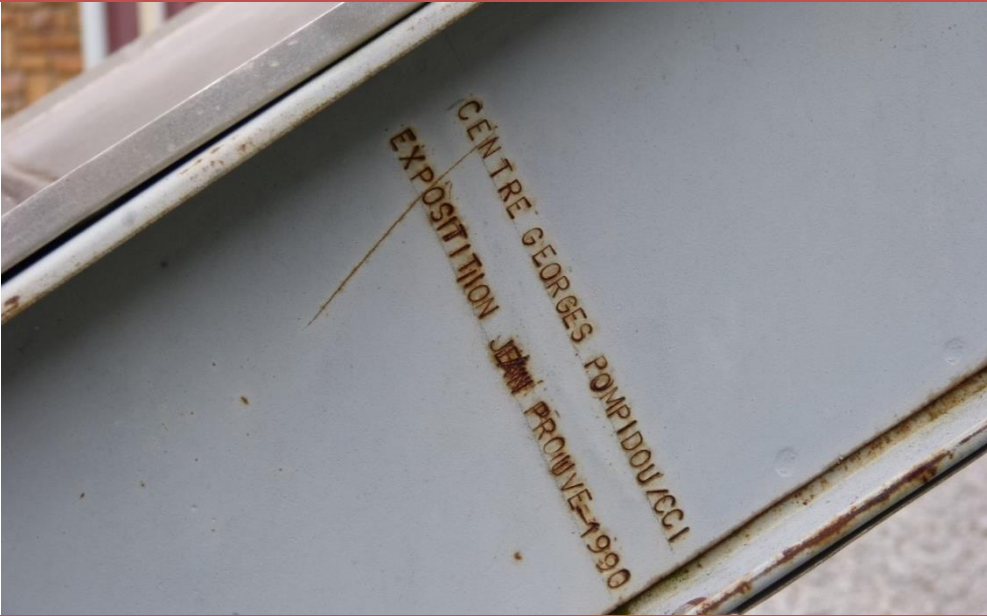
TABLEAU 50. ANALYSE PHOTO N°6 DU SHED

Photo 7	
Partie de pièce	Bords de charpente
Description	Traces marron sur les bords de la charpente
Evaluation	Corrosion présente sur les bords de la charpente. NB: Une corrosion élevée sur tous les bords de la charpente est observée.

TABLEAU 51. ANALYSE PHOTO N°7 DU SHED

Photo 8	
Partie de pièce	Partie en contact avec le socle en béton
Description	Pas de changement notable de la tôle, traces marronnes sur les bords de charpente
Evaluation	La charpente a commencé à se corroder sur les bords près du socle, pas d'effet spécifique observé sur la tôle. <u>NB</u> : Une corrosion élevée sur tous les bords de charpente ainsi que les jointures avec des autres parties de pièce est observée.

TABEAU 52. ANALYSE PHOTO N°8 DU SHED

Photo 9	
Partie de pièce	Côté de la charpente
Description	Le texte dans la couche de peinture endommagé ainsi que la couche de peinture
Evaluation	Corrosion présente où la surface a été endommagée par des gravures, pas de trace de corrosion autour de ces dégâts.

TABEAU 53. ANALYSE PHOTO N°9 DU SHED


Photo 10	
Partie de pièce	Plaque soudée sur le bord de la charpente
Description	Trace de rouille autour du point de soudage
Evaluation	Pas de corrosion élevée autour l'aire de soudage, mais un peu de corrosion visible sur la soudure.

TABLEAU 54. ANALYSE PHOTO N°10 DU SHED

Photo 11	
Partie de pièce	Charpente, partie constitutive de la fenêtre
Description	Surface complètement recouverte de rouille
Evaluation	La corrosion restreint sur la partie de la fenêtre, pas de trace visible de corrosion sur les surfaces en contact avec la partie corrodée.

TABLEAU 55. ANALYSE PHOTO N°11 DU SHED


Photo 12	
Partie de pièce	Vis sur la tôle
Description	La rondelle est entièrement corrodée, la tôle est un peu marron autour le vis
Evaluation	La décoloration de la tôle vient de la rouille issu la rondelle, pas de propagation de la corrosion sur la tôle en contact avec la vis.

TABLEAU 56. ANALYSE PHOTO N°12 DU SHED

Photo 13	
Partie de pièce	Vis sur la charpente
Description	La rondelle est partiellement corrodée ainsi que les bords de la plaque
Evaluation	Pas d'effet visible sur la surface qui est en contact directement avec la vis ainsi que celle qui n'est pas en contact.

TABLEAU 57. ANALYSE PHOTO N°13 DU SHED

Photo 14	
Partie de pièce	Crochet restant de la fenêtre
Description	Partiellement corrodé, décoloration autour et sur le crochet.
Evaluation	Décoloration mais pas de corrosion évidente sur les autres parties du shed. <u>NB</u> : comme commenté sur la photographie n°11, il est possible d'observer une décoloration du shed à cause du cadre de la fenêtre corrodée.

TABLEAU 58. ANALYSE PHOTO N°14 DU SHED

Photo 15	
Partie de pièce	La tôle
Description	Changement de couleur de la tôle.
Evaluation	Provoqué par la pluie.

TABLEAU 59. ANALYSE PHOTO N°15 DU SHED

3.4. ETUDES DES PROBLEMES MAJEURS

Photo	Identifications	Problèmes	Solutions
Photo 1	N	Noircissures	Rénovateur
Photo 2	I	Impact	---
Photo 3	N	Noircissures	Rénovateur
Photo 4	N	Noircissures	Rénovateur
Photo 5.1	CG	Corrosion galvanique fer - aluminium	Rénovateur
Photo 5.2	CG	Corrosion galvanique fer - aluminium	Rénovateur
Photo 6	CG	Corrosion galvanique fer - aluminium	Rénovateur
Photo 7	CG	Corrosion galvanique fer - aluminium	Rénovateur
Photo 8	CG + I	Corrosion galvanique fer - aluminium et déformations	Rénovateur
Photo 9	CG	Corrosion galvanique fer - aluminium	Rénovateur
Photo 10	CG	Corrosion galvanique soudage - aluminium	Rénovateur
Photo 11	CG	Corrosion galvanique fer - aluminium	Rénovateur
Photo 12	CG	Corrosion galvanique fer - aluminium	Rénovateur + Polymère
Photo 13	CG	Corrosion galvanique fer - aluminium	Rénovateur + Polymère
Photo 14	CG	Corrosion galvanique fer - aluminium	Rénovateur + Polymère
Photo 15	S	Saleté	Nettoyage

TABLEAU 60. IDENTIFICATIONS DES PROBLEMES DU SHED ET LES SOLUTIONS

Nombre de fois présent sur la structure	Identifications	% cumulés	ABC
10	CG	62,50 %	A
3	N	81,25 %	A
2	I	93,75 %	B
1	S	100,0 %	C

TABLEAU 61. RESUME DES IDENTIFICATIONS

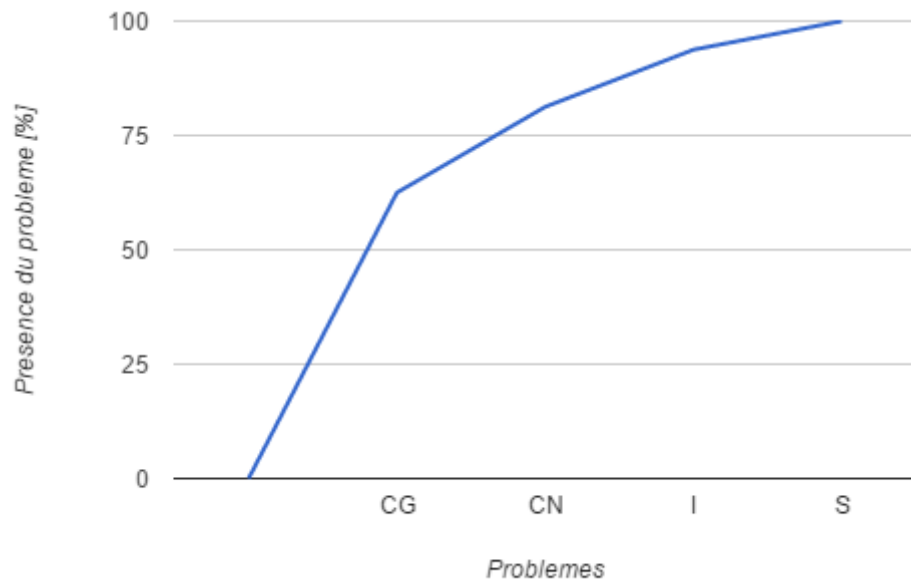


FIGURE 39. DIAGRAMME DE PARETO DU SHED

Le problème le plus grave sur le Shed est donc la corrosion galvanique et les petites taches noires. Cependant, les autres problèmes ont une solution de nettoyage très simple déjà décrite auparavant. Pour arranger la pièce, faudrait déformer la tôle supérieure pour qu'elle retrouve son état initial ce qui n'est pas réalisable.

4. BILAN SUR LES DEFAUTS DE TOUTES LES PIECES

Identifications	Nombre de fois présent sur les structures	% cumulés	ABC
CG	$10 + 2 + 3 = 15$	44,12 %	A
I	$2 + 3 + 1 = 6$	61,76 %	A
CN	$3 + 1 + 1 = 5$	76,47 %	A
OF	$0 + 4 + 0 = 4$	88,23 %	B
S	$1 + 1 + 1 = 3$	97,06 %	C
SO	$0 + 0 + 1 = 1$	100,0 %	C

TABLEAU 62. RECAPITULATIF GLOBAL DES PROBLEMES SUR LES 3 PIECES

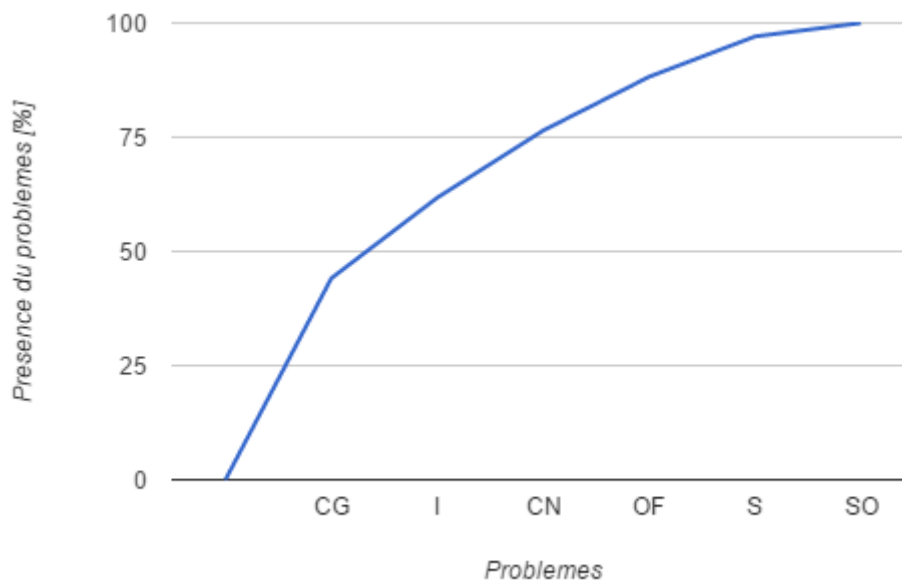


FIGURE 40. DIAGRAMME DE PARETO GLOBAL POUR LES 3 PIECES

De manière générale, il est possible de remarquer les problèmes majeurs (figure 39). En effet, si le pourcentage critique de problèmes est de 80%, les problèmes les plus importants sont:

- la corrosion galvanique ;
- les impacts ;
- les noircissures.

Cependant, la présence de la corrosion galvanique par rapport aux défauts macrostructuraux et les noircissures est majoritaire.

5. PRECONISATION

5.1. INTRODUCTION

D'après la section antérieure, les problèmes les plus présents sont la corrosion galvanique, les impacts et les petites taches noirs. La méthode ABC de Pareto permet de se centrer sur les problèmes les plus importants afin de remarquer que 76,47% des problèmes (type A) sont:

- CG Corrosion Galvanique
- I Impacts
- N Noircissures

Comme la réparation des impacts est très envahissante, cela implique un changement de l'esthétique de la pièce. Par conséquent, seuls les problèmes de la corrosion galvanique et de noircissure seront traités (petites taches noirs).

5.2. CORROSION GALVANIQUE

Le problème de la corrosion galvanique a déjà été traité précédemment. Le problème de la corrosion galvanique peut être résolu facilement si on utilise le même matériau pour les contacts ou un matériau d'une autre famille, si cela est possible, en polymère. Il peut être pris pour exemple le cas de la photo 5.2 du shed (figure 40).



FIGURE 41. CORROSION GALVANIQUE AU NIVEAU D'UNE VIS SUR LE SHED

Il est possible de remarquer que la vis est un métal différent de la structure, probablement en acier, et donc plus noble que l'aluminium. Dans l'objectif d'éviter le transfert d'électrons qui se produit par contact direct, il est possible d'utiliser le même matériau pour les vis que la structure. Il faudrait donc trouver des vis d'aluminium standardisés afin de remplacer les vis en acier. L'échange ne résout pas seulement le problème de la corrosion galvanique mais il est positif pour l'environnement car le recyclage de l'aluminium est meilleur que celui de l'acier. [48]

Une autre solution, pratique à court terme, est le changement de la rondelle pour un matériau inerte comme le PTFE (Téflon). Le problème de ce changement est que la tête du vis n'est plus en contact avec la tôle mais cependant le corps de la vis reste toujours en contact. En d'autres termes, la corrosion galvanique ne se développe plus sur la même surface, moins grande, mais la corrosion existe toujours.

Cependant, l'introduction d'un manchon avec les rondelles est autre solution possible pour éviter le contact entre les différents métaux. Le manchon (figure 41) est un cylindre simple polymérique qui s'introduit entre la vis et la structure. Le problème qui peut exister est de trouver un manchon à la taille du trou.



FIGURE 42. MANCHON EN PLASTIQUE [49]

Il existe d'autre option très similaire au manchon. Il est possible d'utiliser des bandes adhésives spéciales en PTFE qui sont placées sur le vis afin d'éviter le contact avec la structure, il est possible de voir sur la figure 42. Le PTFE existe de même à l'état liquide (figure 43).



FIGURE 43. TEFLON [50]



FIGURE 44. PTFE LIQUIDE [51]

5.3. NOIRCISURES

Les noircissures se produisent sur l'aluminium à cause de la présence du chrome et du fer dans les alliages des pièces (tableau 22, 36, 45). En effet la présence du chrome n'est pas élevée mais cette petite quantité s'accumule sur les joints de grains et se produit, au fur et à mesure, une légère corrosion forment des trous.

Ces petites tâches sont cependant très difficiles à éliminer car il s'agit en effet d'une destruction de la surface par corrosion. L'unique manière d'améliorer la surface est de polir de manière intense toute la surface et d'ensuite utiliser un produit de traitement superficiel comme le vernis ou laquage pour éviter que l'oxydation se répète.



FIGURE 45. EXEMPLE DE NETTOYAGE ALUMINIUM [52]

IV. CONCLUSION

Finalement, afin de traiter les pièces de manière la plus efficace possible, la préconisation est la suivante:

1. LES TACHES NOIRS

Afin d'éliminer les taches noirs dues à la corrosion des éléments présents dans l'alliage (chrome et fer), la pièce doit être polie afin d'éliminer la déformation présente à la surface de la pièce. Cependant, polir enlève la couche de protection de l'aluminium, il faut donc polir délicatement et surtout précisément sur les trous de manière légère. Il faut ensuite atténuer les taches avec des renouveaux.

2. SALETÉ

Après avoir éliminé les trous formés par la corrosion, il faut nettoyer la pièce avec un produit plus agressif la première fois afin d'éliminer toute la saleté. Pour cela, la meilleure solution est une solution acide comme l'acide acétique ou l'acide nitrique. Il faut appliquer cette solution une seule fois dû à sa forte acidité.

3. CORROSION

Après le nettoyage, il est possible d'appliquer un restaurateur pour nettoyer la corrosion présent dans les matériaux et recouvrir les matériaux pour améliorer la qualité de l'aluminium.

4. IMPACTS ET FRACTURES

Dû à l'importance des pièces, il n'est pas possible de faire un traitement pour arranger la structure.

5. PROTECTION A LONG TERME

5.1. RECOUVREMENT

Après la récupération de la propreté des pièces, il est possible d'appliquer un recouvrement, comme par exemple un recouvrement par vernis transparent à base acrylique, pour protéger la pièce de nombreux facteurs comme les UV, l'humidité, les acides, les intempéries, etc...

5.2. NETTOYAGE

Finalement, un nettoyage fréquent et constant protège les pièces à long terme. En effet, l'intensité du nettoyage et l'agressivité du produit chimique est guidé par la fréquence de nettoyage. En effet, plus le lavage est fréquent et plus le produit doit être doux.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Collectif. (2001). *Jean Prouvé constructeur 1901-1984*. Nancy: RMN.
- [2] *Jean Prouvé*. (s.d.). Consulté le Janvier 25, 2016, sur Galerie Patrick Seguin: <http://www.patrickseguin.com/fr/designers/biographie-jean-prouve/>
- [3] Thilleul, K. (2008). *Acier ou aluminium ? Les incidences du choix des matériaux dans le production des maisons industrialisées*. Paris: Institut pour l'histoire de l'aluminium.
- [4] *Jean Prouvé*. (2012). Nancy: Somogy / Musée des beaux-arts de Nancy.
- [5] *Jean Prouvé à Nancy*. (2012, juin-octobre). Consulté le Décembre 12, 2015, sur Ecole de Nancy: http://www.ecole-de-nancy.com/web/uploads/file/documents_pdf/actualites/men/2012_jean_prouve/dossier%20de%20presse%20mail%2031%2001.pdf
- [6] Archieri, J.-F. (1990). *Prouvé : cours du CNAM, 1957-1970 : essai de reconstruction du cours à partir des archives Jean Prouvé / textes de Jean-François Archieri et dessins de Jean-Pierre Levasseur ; préf. de Hubert Damisch*. Liège: Mardaga.
- [7] Vargel. (1998). *La corrosion de l'aluminium*. Paris: Edition.
- [8] Rhenalu, P. (1997). *Demi-produits aluminium*. Courbevoie.
- [9] *Planétoscope*. (s.d.). Consulté le Février 18, 2016, sur <http://www.planetoscope.com>
- [10] *Alliage d'aluminium pour corroyage*. (s.d.). Consulté le Février 21, 2016, sur Wikipédia: https://fr.wikipedia.org/wiki/Alliage_d%27aluminium_pour_corroyage
- [11] *Aluminium et alliages d'aluminium*. (s.d.). Consulté le Février 21, 2016, sur Acier spéciaux: <http://www.aciersspeciaux.fr/aluminium-et-alliages-d-aluminium/>
- [12] Konig, C. (s.d.). *L'aluminium un métal d'exception*. Consulté le 12 15, 2015, sur Futura -sciences: <http://www.futura-sciences.com/getpdf/dossier/780/4d140d6bd8f8206ee5f1724277afd8cd>
- [13] Barisone, E. (2011). *La décharge luminescente comme outil analytique. Influence du taux d'émission d'électrons secondaires sur ses caractéristiques*. Doctorat de l'université de Toulouse.
- [14] *Beispiele aus der Praxis*. (s.d.). Consulté le mai 6, 2016, sur OFG - Analytik: <http://www.ofg-analytik.de/de/htm/beispiele/praxis06.html>
- [15] *Fig. 2. The results of the modelled and the measured (GDMS) profiles of implanted elements*. (2008). Recuperado el 2 de avril de 2016, de ResearchGate: https://www.researchgate.net/figure/270157331_fig2_Fig-2-The-results-of-the-modelled-and-the-measured-GDMS-profiles-of-implanted
- [16] *Spectrométrie à Décharge Luminescente SDL*. (s.d.). Consulté le mai 2, 2016, sur Institut UTINAM: http://plateforme-chimie.utinam.cnrs.fr/doku.php?id=spectrometrie_a_decharge_luminescente_sdl
- [17] *Laser-Induced Plasma Spectrometry With Chemical Seeding and Application to Flow Mixing Analysis in Methane-Air Flames*. (s.d.). Consulté le mai 2, 2016, sur ASME: <http://energyresources.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1888734>
- [18] Sulzer, P. (2005). *Jean Prouvé : oeuvre complète / complete works ; volume 3 ; 1944-1954*. Birkhauser Verlag.

- [19] *5083 (AW-ALMg4,5Mn0,7)*. (s.d.). Consulté le Mai 5, 2016, sur Euralliage:
<http://www.euralliage.com/5083.htm>
- [20] *5754 (AW-ALMg3)*. (s.d.). Consulté le Mai 5, 2016, sur Euralliage:
<http://www.euralliage.com/5754.htm>
- [21] *6082 (AW-ALSi1MgMn)*. (s.d.). Consulté le Mai 5, 2016, sur Euralliage:
<http://www.euralliage.com/6082.htm>
- [22] *Corrosion aqueuse*. (s.d.). Consulté le 2 juin, 2016, sur Wikipédia:
https://fr.wikipedia.org/wiki/Corrosion_aqueuse
- [23] *Eliminar moho del metal*. (s.d.). Consulté le Avril 21, 2016, sur Eliminar moho:
<http://eliminarmoho.org/moho-metal>
- [24] *Limpieza de aluminio, acero, plata y otros metales*. (s.d.). Consulté le Avril 26, 2016, sur Decoesfera: <http://www.decoesfera.com/varios/limpieza-metales-aluminio-acero-y-plata-entre-otros>
- [25] *Limpieza de los metales*. (2005, Septembre 27). Consulté le Avril 27, 2016, sur limpieza.com:
<http://www.limpieza.com/novedades/limpieza-de-los-metales-743.html>
- [26] *Comment faire pour supprimer des moisissures d'aluminium*. (s.d.). Consulté le avril 12, 2016, sur aac-mo: <http://www.aac-mo.com/comment-faire-pour-supprimer-de-moisissures-de-aluminium.html>
- [27] *Moho*. (s.d.). Consulté le Avril 21, 2016, sur Wikipédia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Moho>
- [28] *clearvarnish*. (s.d.). Consulté le Avril 25, 2016, sur Lodan: <http://www.lodan.be/clearvarnish.htm>
- [29] *Entretien de l'aluminium anodisé*. (s.d.). Consulté le Février 10, 2016, sur ALUMINIUM:
<http://www.aluminium.fr/industrie/associations/adal/entretien-environnement/entretien-aluminium-anodise>
- [30] *Entretien de l'aluminium thermolaqué*. (s.d.). Consulté le Février 10, 2016, sur ALUMINIUM:
<http://www.aluminium.fr/industrie/associations/adal/entretien-environnement/entretien-aluminium-thermolaque>
- [31] *Dilatacion térmica*. (s.d.). Consulté le Avril 28, 2016, sur Wikipédia:
https://es.wikipedia.org/wiki/Dilataci%C3%B3n_t%C3%A9rmica
- [32] *Coeficiente de dilatacion*. (s.d.). Consulté le Avril 28, 2016, sur Wikipédia:
https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_dilataci%C3%B3n
- [33] *Average weather for Nancy, France*. (s.d.). Consulté le Avril 26, 2016, sur WeatherSpark:
<https://weatherspark.com/averages/32169/Nancy-Lorraine-France>
- [34] *Comportement mécanique des matériaux*. (s.d.). Consulté le Avril 26, 2016, sur Propriétés des matériaux/logiciels de simulation:
http://www.simulationmatériaux.com/ComportementMecanique/comportement_mecanique_Liste_coefficients_de_dilatation_thermique.php
- [35] QuimiTube. (s.d.). *¿ El aluminio se oxyda ?* Consulté le Février 10, 2016, sur QuimiTube:
<http://www.quimitube.com/oxidacion-aluminio>
- [36] *Comment anodiser certaines pièces aluminium de nos ULM ?* (2005). Consulté le mars 14, 2016, sur ULM Actualité: <http://www.ulm-actualite.info/anodisation-aluminium-ulm>

- [37] *Anodiser*. (2004, avril). Consulté le mars 14, 2016, sur Cahier IBS: http://www.bil-ibs.be/sites/default/files/publicaties/200404_65a09_fiche_dinfo_aluminium_p7_2_anodiser.pdf
- [38] Gilmour, B. (2012, septembre 3). How to anodize aluminium #4 - simple dye techniques.
- [39] MATTER, A. e. (s.d.). *Prévention de la corrosion et contrôle*. Consulté le Avril 15, 2016, sur alumatter: <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/fre/default.asp?catid=181&pageid=2144416708>
- [40] *Hard Coat Anodizing of an Aluminum Component for an Automotive Transmission Application*. (s.d.). Consulté le Mai 4, 2016, sur Elm Plating Company: <http://www.elmplating.com/hard-coat-anodizing-aluminum-component-automotive-transmission-michigan.html>
- [41] Bertorello, S. (2016, mai 15). *L'anodisation de l'aluminium*. Consulté le mars 15, 2016, sur Technique d'astronome amateur: <http://serge.bertorello.free.fr/index.html>
- [42] *Barniz*. (s.d.). Consulté le Avril 21, 2016, sur Wikipédia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Barniz>
- [43] *clear varnish - vernis 127*. (s.d.). Consulté le Mai 10, 2016, sur Lodan: <http://www.lodan.be/fichesTechniques/2008clearvarnishhaerosol.pdf>
- [44] *Aluminiums, chromes, inox, cuivre, laiton*. (s.d.). Consulté le Mai 2, 2016, sur Reston: <http://restom.net/14-aluminiums-chromes-inox-cuivre-laiton>
- [45] Connaissance des arts. (2001). *Jean Prouvé*. Connaissance des arts.
- [46] Pillet, F. (2007). *Les sheds, introduction et développement dans l'architecture de l'industrie*.
- [47] *Imprimerie Mame*. (2012, octobre 9). Consulté le décembre 14, 2015, sur Lili l'archi: <http://lililarchi.com/imprimeriemame/>
- [48] *Aluminium*. (s.d.). Consulté le Avril 28, 2016, sur CEFIPA: <http://www.cefipa.fr/aluminium/aluminium.html>
- [49] *Manchon denté*. (s.d.). Consulté le mai 2, 2016, sur Michaud Chailly: <http://www.michaud-chailly.fr/manchon-dente-m3-a5-163/>
- [50] *Usos des teflon*. (s.d.). Consulté le mai 2, 2016, sur TRAXCO: <http://www.traxco.es/blog/tecnologia-del-riego/usos-del-teflon>
- [51] *Sellador de roscas PTFE 567*. (s.d.). Consulté le mai 2, 2016, sur JOMS: http://www.jomsmx.com.mx/sellador_567.html
- [52] *Como limpiar los cromados*. (s.d.). Consulté le avril 2, 2016, sur Como-limpiar.org: <http://como-limpiar.org/como-limpiar-los-cromados/>

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Tableau 1. Propriétés de l'aluminium	21
Tableau 2. Série d'alliage de l'aluminium	21
Tableau 3. Element d'addition dans les alliages	22
Tableau 4. Traitements thermiques des alliages de moulage	23
Tableau 5. Traitements thermiques des alliages de corroyage	26
Tableau 6. Différents traitement par écrouissage	27
Tableau 7. Différents traitement par ecrouissage	27
Tableau 8. Composition de l'alliage AG3	32
Tableau 9. Composition de l'alliage AG5	32
Tableau 10. Propriétés mécaniques de l'alliage AG3	32
Tableau 11. Propriétés mécaniques de l'alliage AG5	32
Tableau 12. Résistance à la corrosion de l'alliage AG3	33
Tableau 13. Résistance à la corrosion de l'alliage AG5]	33
Tableau 14. Composition de l'alliage ASG	33
Tableau 15. Propriétés mécaniques de l'alliage ASG]	34
Tableau 16. Résistance à la corrosion de l'alliage ASG	34
Tableau 17. Facteurs qui affectent les matériaux	38
Tableau 18. Liste de produits nettoyants et leur agressivité	40
Tableau 19. Liste de produits nettoyants et leur agressivité sur l'aluminium laqué	41
Tableau 20. Fiche technique du vernis	48
Tableau 21. Tableau récapitulatif des problèmes sur le portique	54
Tableau 22. Analyse photo n°1 du portique	55
Tableau 23. Analyse photo n°2 du portique	55
Tableau 24. Analyse photo n°3 du portique	56
Tableau 25. Analyse photo n°4 du portique	56
Tableau 26. Analyse photo n°5 du portique	57
Tableau 27. Analyse photo n°6 du portique	57
Tableau 28. Analyse photo n°7 du portique	58
Tableau 29. Analyse photo n°8 du portique	58
Tableau 30. Analyse photo n°9 du portique	59
Tableau 31. Analyse photo n°10 du portique	59
Tableau 32. Analyse photo n°11 du portique	60
Tableau 33. Identification des problèmes du portique et les solutions	61
Tableau 34. Récapitulatif des identifications	61
Tableau 35. Tableau récapitulatif des problèmes du pavillon	65
Tableau 36. Analyse photo n°1 du pavillon	66
Tableau 37. Analyse photo n°2 du pavillon	66
Tableau 38. Analyse photo n°3 du pavillon	67
Tableau 39. Analyse photo n°4 et 5 du pavillon	67
Tableau 40. Analyse photo n°6 du pavillon	68
Tableau 41. Analyse photo n°7 du pavillon	68
Tableau 42. Identification des problèmes du pavillon et les solutions	69
Tableau 43. Résumé des identifications	69
Tableau 44. Tableau récapitulatif de l'analyse des photos du Shed	77
Tableau 45. Analyse photo n°1 du Shed	78
Tableau 46. Analyse photo n°2 du Shed	78
Tableau 47. Analyse photo n°3 du Shed	79
Tableau 48. Analyse photo n°4 du Shed	79
Tableau 49. Analyse photo n°5.1 et 5.2 du Shed	80
Tableau 50. Analyse photo n°6 du Shed	81
Tableau 51. Analyse photo n°7 du Shed	81
Tableau 52. Analyse photo n°8 du Shed	82
Tableau 53. Analyse photo n°9 du Shed	82
Tableau 54. Analyse photo n°10 du Shed	83

Tableau 55. Analyse photo n°11 du Shed	83
Tableau 56. Analyse photo n°12 du Shed	84
Tableau 57. Analyse photo n°13 du Shed	84
Tableau 58. Analyse photo n°14 du Shed	85
Tableau 59. Analyse photo n°15 du Shed	85
Tableau 60. Identifications des problèmes du Shed et les solutions	86
Tableau 61. Résumé des identifications	86
Tableau 62. Récapitulatif global des problèmes sur les 3 pièces	88
Figure 1. PBS	10
Figure 2. Gantt général	11
Figure 3. Gantt détaillé pour deux phases	11
Figure 4. Exemple d'une partie du WBS	12
Figure 5. Fichier de personnes ressources	13
Figure 6. Procédé BAYER	18
Figure 7. Réaction lors de l'électrolyse	19
Figure 8. Schéma montrant la disposition des deux électrodes et coupe en 3D de l'appareil	28
Figure 9. Analyse GDos	28
Figure 10. Analyse GDMS	28
Figure 11. Cratère à la surface d'un échantillon	29
Figure 12. Spectre d'émission à analyser	29
Figure 13. Imagerie de structure d'un matériau observé au microscope optique	30
Figure 14. Imagerie de structure d'un matériau observé au microscope électronique à balayage	30
Figure 15. Diffractogramme d'un matériau	31
Figure 16. Schéma de corrosion par piqûre dans un échantillon d'aluminium	35
Figure 17. Exemple de corrosion au niveau de vis et boulons	36
Figure 18. Evolution de la température sur une année à Nancy	42
Figure 19. Schéma de l'électrolyse	45
Figure 20. Section transversale du film andique poreux visualisé avec TEM	45
Figure 21. Pièce en alliage d'aluminium avant son traitement (en bas) et à la sortie du bain d'acide après l'anodisation (en haut)	46
Figure 22. Pièce en alliage d'aluminium avant son traitement (à gauche) et à la sortie du bain d'acide après l'anodisation (à droite)	46
Figure 23. Nettoyage d'un moteur en aluminium avec un restaurateur	49
Figure 24. Le portique à l'aéroport d'Orly	51
Figure 25. Le portique d'Orly au musée de l'histoire du fer	51
Figure 26. Le portique d'Orly annoté pour l'étude des problèmes	53
Figure 27. Diagramme de Pareto du Portique d'Orly	61
Figure 28. Installation du Pavillon de l'aluminium le long de la Seine à Paris	62
Figure 29. La poutre du pavillon de l'aluminium annoté pour l'étude des problèmes	64
Figure 30. Diagramme de Pareto du pavillon de l'aluminium	69
Figure 31. Modélisation de la poutre avec CATIAv4	70
Figure 32. Modélisation des contraintes avec ABAQUS	71
Figure 33. Modélisation de la déformation avec ABAQUS	72
Figure 34. Imprimerie Mame à Tours	73
Figure 35. Shed en construction dans les années 50 à Tours	74
Figure 36. Toiture de l'imprimerie Mame composée de sheds	75
Figure 37. Shed au musée de l'Histoire du Fer	75
Figure 38. Shed annoté pour l'étude des problèmes	76
Figure 39. Diagramme de Pareto du Shed	87
Figure 40. Diagramme de Pareto global pour les 3 pièces	88
Figure 41. Corrosion galvanique au niveau d'une vis sur le Shed	89
Figure 42. Manchon en plastique	90
Figure 43. Téflon	90
Figure 44. PTFE liquide	90
Figure 45. Exemple de nettoyage aluminium	91

V. ANNEXES

ANNEXE 1 : DIAGRAMME DE PARETO

1. DEFINITION ET UTILITE

Lors de la description de l'état actuel des trois pièces en aluminium, on a été amené à déceler les différents défauts et altérations au niveau de la structure externe des pièces et par conséquent à établir une classification qui nous permettra de conclure quant au danger que présente chaque défaut.

La classification issue du diagramme de Pareto repose essentiellement sur la fréquence de répétition des phénomènes étudiés, et leur accorde la même importance à la base. Il élucide, par ailleurs, parfaitement la loi des 20/80 à laquelle obéissent de nombreux phénomènes observés, et qui stipule qu'en agissant simplement sur 20% des constatations, les effets produits se manifestent à ordre de 80%.

Le diagramme de Pareto est fortement utilisé dans le milieu industriel comme outil d'analyse simple mais puissant de prise de décision opérant d'abord sur les phénomènes prioritaires.

2. CONSTRUCTION

Sa construction est assez simple, il suffit de calculer à la fois le pourcentage de chaque singularité ainsi que le pourcentage cumulé pour obtenir deux courbes.

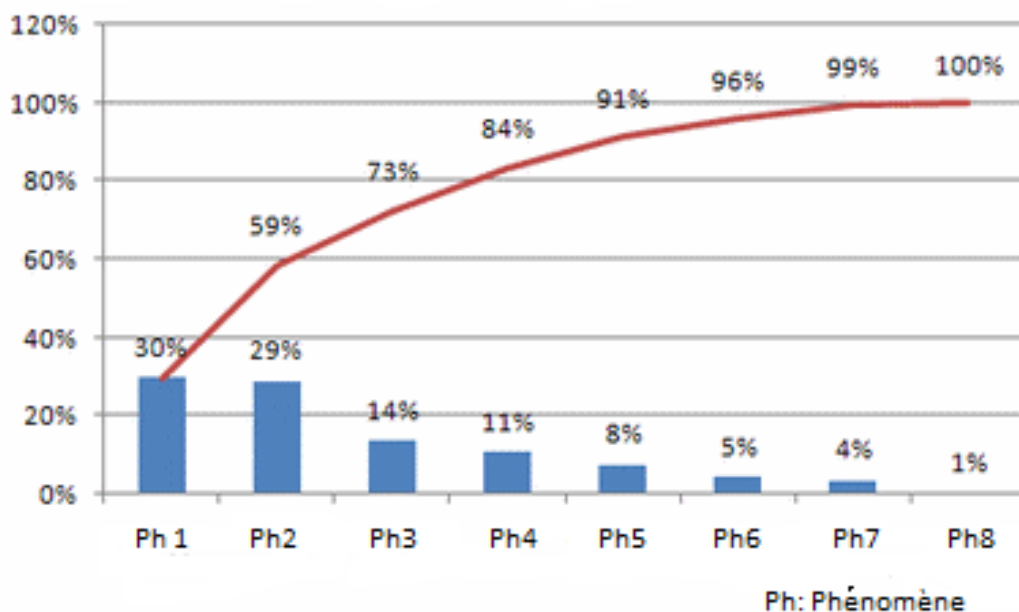


Figure. Exemple de diagramme de Pareto

Les barres en bleu sur la figure 1 représentent le pourcentage d'occurrence de chaque phénomène tandis que la courbe rouge représente le pourcentage cumulé.

3. EXPLOITATION ET CONCLUSIONS

Dans le cadre de cet exemple, 59% des problèmes peuvent être éliminés en agissant sur les deux premiers axes et de la même manière, plus de 80% des soucis réglés en opérant seulement sur la moitié des causes.

ANNEXE 2 : VERNIS

Pour l'augmentation de la résistance de la surface à la dégradation générale, il y existe une grande gamme de produits qu'il est possible d'appliquer pour créer une couche de protection sur l'aluminium. Il existe une grande variété de solutions à base de polymère ou de résine et des solvants. Tous les produits mentionnés ci-dessous peuvent être appliqués directement sur le métal après nettoyage. Aucun autre traitement de surface n'est nécessaire. Ce sont des produits spécifiques pour des éléments de bâtiments.

NB: Aucune information n'a été trouvée sur le changement de surface à long terme provoqué par les produits.

Produit	Metal Protector MD
Type de produit	Silicone en solvant
Information technique	Protection contre <ul style="list-style-type: none"> • Acides • Rayons • UV • Détergents • Atmosphère salines • Sel • Intempéries Durable Pas de changement d'allure de l'objet
Domain d'utilisation	Utilisable pour une grande variété de métal, dont l'aluminium anodisé

<http://www.buildingrestorationproducts.com/restoration-products/metal/protection/metal-protector-md>

Produit	Everbrite protective coating
Type de produit	Résine Polymérique en solvant
Information technique	Protection contre <ul style="list-style-type: none"> • Acides • Bases • Agents chimiques • Huiles • Rayons • UV • Atmosphère salines • Sel • Moisissure • Intempéries Incolore, mais avec une allure brillante
Domain d'utilisation	Utilisable sur des métaux comme cuivre, inox, aluminium et des surfaces peintes.

<http://www.ebcoat.com/EB%20Info%20Sheet.pdf>

Produit	EVB23309E Protective Coating
Type de produit	Dipropylène Glycol en Diméthyle Ether
Information technique	<p>Vernis de haute protection</p> <ul style="list-style-type: none"> • Acides • Bases • Agents chimiques • UV • Détergents • Atmosphère salines • Sel • Ternissement • Intempéries <p>Incolore</p>
Domain d'utilisation	Aluminium anodisé ou revêtu de poudre

<http://www.bromoco.co.uk/Refurbishmentofaluminiumwindows.aspx>

ANNEXE 3 : RESTAURATEURS

Les restaurateurs sont des produits très utilisés dans l'industrie qui, comme leur nom l'indique, sont utilisés pour restaurer et conserver les pièces de manière générale. Due à la grande utilisation de l'aluminium dans de nombreux et très différents domaines, il existe de multiples options pour restaurer l'aluminium.

Ici quelques produits du marché sont présentés mais il en existe bien d'autres encore. Pour plus d'information sur l'application de ces restaurateurs, il est possible de se renseigner avec les liens présents sous chaque fiche.

De plus, il existe un grand nombre d'entreprises qui s'occupent de la restauration de pièces architecturales.

Produit	EnviRestore MSR
Prix	Une quart \$65.68
Type de produit	Abrasif léger
Domaine d'utilisation	Aluminium anodisé et matériaux composé d'aluminium sur des façades de bâtiments.
Information technique	Enlève: <ul style="list-style-type: none">• Dépôts calcaires• Corrosion• Traces noirâtres et d'oxydation• Salissures• Huiles• Teinture adhésive• Lixiviation de la surface

<http://www.buildingrestorationproducts.com/restoration-products/metal/restoration/envirestor>

Produit	Metal Resurfacer
Prix	Une quart \$65.68
Type de produit	Restauration de surface grâce à des nanoparticules, solvant à base d'eau, pas d'abrasifs sévère.
Domain d'utilisation	Restaurateur de métaux et d'aluminium anodisé, généralement utilisé pour des détails architecturaux.
Information technique	Enlève: <ul style="list-style-type: none">• Corrosion• Dépôts calcaires• Frottements légers• Brûlure chimique• Teinture adhésive• Lixiviation de la surface• Résidu de couche auparavant appliqué• Gaz d'échappement

<http://www.prestorestorationproducts.com/restoration-products/metal/restoration/metal-resurfacer>

Produit	Restaur alu
Prix	Flacon 500 ml 30.9
Type de produit	Crème liquide beige clair
Domain d'utilisation	Il convient pour aluminium brut et anodisé, pour tous détails sur des bâtiments
Information technique	<p>Enlève:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Traces noires et traces d'oxydation, • Salissures • Dépôts calcaires • Voiles et points blanchâtres • Traces de crayon • Traces persistantes de doigt • Frottements légers

http://www.trenois.com/images_produits/PDF/lod093%20fiche-technique.pdf